



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROPUESTA PARA EL MANEJO INTEGRAL DE  
LOS RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y  
ELECTRÓNICOS (RAEE) EN MÉXICO,  
CONSIDERANDO EL RECICLAJE PARA LA  
RECUPERACIÓN DE ORO**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Cabanillas Ramírez Marco Antonio

Que para obtener el título de

**Ingeniero en Computación**

**P R E S E N T A**

Cervantes Sánchez Mario Rodrigo

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. García Villanueva Luis Antonio



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Índice:

Resumen.....	3
Dedicatorias y agradecimientos.....	4
Lista de tablas.....	5
Lista de figuras.....	7
Lista de acrónimos.....	13
1. Capítulo I Introducción.....	16
1.1. Planteamiento del problema.....	19
1.2. Objetivo general.....	20
1.3. Objetivos específicos.....	20
1.4. Alcances y limitaciones.....	21
2. Capítulo II Marco teórico.....	22
2.1. Minería electrónica.....	23
2.1.1. Los RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos).....	25
2.1.2. Introducción al análisis de datos.....	27
2.1.3. Minería electrónica en México.....	28
2.1.4. Obsolescencia.....	30
2.2. Clasificación: Materiales y componentes valorados de los RAEE.....	33
2.2.1. Computadoras.....	35
2.2.2. Celulares.....	39
2.2.3. Televisiones.....	42
2.3. Impactos.....	46
2.3.1. Impactos a la salud.....	46
2.3.2. Impacto ambiental.....	49
2.3.3. Impacto económico.....	53
2.3.4. Impacto social.....	58
2.3.5. Impacto político.....	60
2.4. Marco legal nacional e internacional de los RAEE.....	61
2.4.1. Convenios internacionales.....	61
2.4.2. Marco legal internacional.....	63
2.4.3. Marco legal nacional.....	72
2.5. Introducción al plan de manejo.....	74
2.5.1. Fases del proceso del manejo integral.....	74
2.5.2. Logística inversa y sistemas suaves.....	86
3. Capítulo III Justificación de la Propuesta del Plan de Manejo Integral de los RAEE	
3.1. Implementación del análisis de datos.....	89
3.1.1. Regresión lineal de los RAEE generados en el mundo.....	89
3.1.2. Regresión lineal de los RAEE generados en México.....	92
3.1.3. Agrupamiento K-Means de RAEE por 180 países.....	95

3.1.4.	Agrupamiento K-Means de los países que más generan RAEE.....	102
3.1.5.	Comparación de países con y sin legislación en el reciclaje de los RAEE.....	107
3.2.	Propuesta de las normativas de los RAEE.....	114
4.	Capítulo IV Propuesta del Plan de Manejo Integral de los RAEE.....	115
4.1.	Fases de la propuesta.....	116
4.1.1.	Proceso de recolección y transporte ... ..	117
4.1.2.	Proceso de recepción y almacenamiento .....	119
4.1.3.	Proceso de desmontaje y separación .....	120
4.1.4.	Técnicas de tratamiento .....	121
4.1.5.	Proceso de refinamiento .....	122
4.1.6.	Reincorporación de la materia prima al ciclo productivo.....	123
4.2.	Propuesta para la recuperación de oro.....	127
4.2.1.	Análisis de las muestras.....	127
4.2.2.	Propuesta de separación por ataque ácido a pines.....	130
4.2.3.	Propuesta de separación por ataque ácido a tarjetas.....	133
5.	Capítulo V Conclusiones y discusión de trabajo futuro.....	136
6.	Bibliografía consultada.....	142
7.	Anexo 1: Código de Python para el análisis de datos.....	148
8.	Anexo 2: Conjuntos de datos.....	159

## **Resumen**

En las últimas décadas, las innovaciones tecnológicas forman cada vez más parte de las actividades cotidianas promoviendo el consumismo, a la par los aparatos tecnológicos son eventualmente desechables con mayor frecuencia, aumentando a pasos agigantados la cantidad de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) en todo el mundo.

Las consecuencias que conllevan los RAEE para la salud de las personas y al medio ambiente son un problema presente que aumentará a futuro, de igual forma el país carece de leyes y normativas que regulen estos residuos, teniendo una economía lineal insostenible que agotará los recursos no renovables.

Por lo que, en esta tesis con base a un análisis de datos de la generación, reciclaje, patrones de consumo y proyecciones de estos residuos; al manejo de los impactos a la salud, ambientales, económicos, sociales y políticos; y considerando propuestas de leyes y normativas que pueden ser adecuados para implementar en México. Se propone un plan de manejo integral de los RAEE con 6 fases a seguir: recolección y transporte, recepción y almacenamiento, desmontaje y separación, técnicas de tratamiento, refinamiento y reincorporación de la materia prima al ciclo productivo. Incentivando el reciclaje de estos, ya que la mayor parte puede ser recuperada y aprovechada, ofreciendo una economía sustentable, con las fases planteadas.

Finalmente, se resalta que la mayor rentabilidad que puede tener una planta de tratamiento de RAEE es con la recuperación de oro de estos residuos, por lo que se proponen experimentos para su recuperación.

## **Dedicatorias y agradecimientos**

- *Cabanillas Ramírez Marco Antonio:*

Quiero agradecer a la vida por haber tenido la posibilidad de poder utilizar mis facultades para hacer uso de ellas y así servir a la comunidad en pro de mejorar esta.

A mi familia por haberme apoyado a darme el tiempo de aprender a base de darme la libertad de tomar mis propias decisiones y a analizar mis errores.

A mi compañero de tesis Mario Cervantes por querer tomarse el tiempo de trabajar juntos e impulsar las ideas con su perspectiva y habilidades, haciendo el trabajo más ameno.

A todas las personas que ayudaron con la recolección de residuos para el avance del proyecto.

Y al sinodal Dr. García Villanueva que siempre estuvo dispuesto a resolver las adversidades del trabajo.

- *Cervantes Sánchez Mario Rodrigo:*

Agradezco a mi familia por darme su apoyo cuando lo necesitaba. A mis amigos que me han ayudado a crecer y obtener experiencia a lo largo de mi vida.

A mi compañero de tesis Marco Cabanillas por compartir sus ideas, perspectivas y habilidades para la realización del trabajo y haber estado siempre dispuesto a trabajar en la tesis facilitando la realización de esta.

Y a nuestro tutor de tesis Dr. García Villanueva quien nos guio y ayudó con sus consejos a lo largo de la realización de este trabajo.

## Lista de tablas

- ❖ Tabla 2.1. Elaboración propia. (2021). *Aprovechamiento de materiales recuperados*. Recuperado de <https://www.bloquetech.com/el-uso-de-material-reciclado/>
- ❖ Tabla 2.2. Figura 40. SEDEMA- (2021). *Categorías de los RAEE en el Reciclación*. Recuperado de, <https://www.sedema.cdmx.gob.mx>
- ❖ Tabla 2.3. Elaboración propia. (2021). *Predicciones de RAEE generados en el mundo y por habitante*.
- ❖ Tabla 2.4. Elaboración propia. (2021). *Componentes de computadora*.
- ❖ Tabla 2.5. INECC (2013). *Porcentaje de metales preciosos en una computadora*. Recuperado de <https://www.gob.mx/inecc>
- ❖ Tabla 2.6. Valero, A. (2010). *Fechas estimadas para el agotamiento de producción*. Recuperado de, *Conservation and Recycling* 54: 1074-1083. doi:10.1016/j.resconrec.2010.02.010.
- ❖ Tabla 2.7. Directiva 2002/96/EC de la Unión Europea. (2003). *Clasificación de los RAEE Directiva EU 2002*. Recuperado de <https://www.boe.es/doue/2003/037/L00024-00039.pdf>
- ❖ Tabla 2.8. Directiva 2012/19/UE de la Unión Europea (2012). *Clasificación de los RAEE Directiva EU 2012*. Recuperado de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32012L0019>
- ❖ Tabla 2.9. ACRR. (2002). *Normativas en diferentes países europeos*. Recuperado de <http://www.residuoselectronicos.net/archivos/documentos/LaGestionRAEE.pdf>
- ❖ Tabla 2.10. CRETIB. (2018). *Clasificación del CRETIB*. Recuperado de <https://reca-ecologic.com/cretib-residuos-peligrosos/#:~:text=Algunos%20ejemplos%20son%3A%20%20C3%A1cido%20p%20C3%A9rico%20C%20cloratos%20C%20per%20C3%B3xidos%20C%20trinitro%20luceno.&text=Un%20residuo%20se%20considera%20t%20C3%B3xico,contacto%20directo%20con%20la%20piel.>
- ❖ Tabla 3.1. Elaboración propia. (2021). *Predicción es de RAEE generados en el mundo y por habitante*.
- ❖ Tabla 3.2. Elaboración propia. (2021). *Predicciones de RAEE generados en México*.
- ❖ Tabla 3.3. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados por continente en 2019*. Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).
- ❖ Tabla 3.4. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados y reciclados por continente 2019*. Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

- ❖ Tabla 3.5. Elaboración propia. (2021). *Resultados del algoritmo K-means de RAEE generados por 180 países.*
- ❖ Tabla 3.6. Elaboración propia. (2021). *Los 15 países que más RAEE generan.* Datos tomados de: (Baldé et al., 2017 y 2020).
- ❖ Tabla 3.7. Elaboración propia. (2021). *Resultados del algoritmo K-means de los países que más RAEE generan.*
- ❖ Tabla 3.8. Elaboración propia (2021). *Situación de los RAEE en Europa 2019.* (Baldé et al., 2020).
- ❖ Tabla 3.9. Elaboración propia (2021). *Situación de los RAEE en Asia 2019.* (Baldé et al., 2020).
- ❖ Tabla 3.10. Elaboración propia (2021). *Situación de los RAEE en África 2019.* (Baldé et al., 2020).
- ❖ Tabla 3.11. Elaboración propia (2021). *Situación de los RAEE en América 2019.* (Baldé et al., 2020).
- ❖ Tabla 3.12. Elaboración propia (2021). *Países con y sin legislación RAEE 2019* (Baldé et al., 2020).
- ❖ Tabla 4.1 Elaboración propia (2021). *Precios aproximados de una tonelada de RAEE. Supraciclaje.* (2021). *Compra/Venta de chatarra y reciclados por kilogramos.* Recuperado el 27 de junio de 2021, de <https://www.supraciclaje.com/precios-hoy/>
- ❖ Tabla 4.2. Elaboración propia (2021). *Tabla de materiales obtenidos.*

## Lista de figuras:

- ❖ Figura 2.1. Elaboración propia. (2021). *Promedio mundial de electrodomésticos según el nivel de ingresos*. [Gráfica]. Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 2.2. SEDEMA- (2021). *Logo SEDEMA*. [Imagen]. Recuperado de, <https://www.sedema.cdmx.gob.mx>
- ❖ Figura 2.3. Pascual Juan. (2016). *Evolución tecnológica*. [Imagen]. Recuperado de, <https://computerhoy.com/listas/hardware/15-cosas-que-puedes-hacer-ordenador-viejo-51550>
- ❖ Figura 2.4. Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P. (2017). *Vida útil de los productos*. [Imagen]. Recuperado de [https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/GEM\\_2017-S.pdf](https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/GEM_2017-S.pdf)
- ❖ Figura 2.5. Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P. (2017). *Tasa de crecimiento estimada de los residuos electrónicos por categorías*. [Imagen]. Recuperado de [https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/GEM\\_2017-S.pdf](https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/GEM_2017-S.pdf)
- ❖ Figura 2.6. Elaboración propia (2010). Tarjeta madre y sus partes [Imagen].
- ❖ Figura 2.7. Elaboración propia (2021). *Porcentaje de material en una computadora*. [Gráfica].
- ❖ Figura 2.8. Elaboración propia (2021). *Procesador*. [Imagen].
- ❖ Figura 2.9. Elaboración propia (2021). *Pines de tarjetas RAM y de sonido*. [Imagen].
- ❖ Figura 2.10. Elaboración propia (2021). *Celulares en desuso*. [Imagen].
- ❖ Figura 2.11. Forbes (2020) *Participación de mercado por fabricante de equipo*. [Gráfica] Recuperado de <https://www.forbes.com.mx/mexico-se-aproxima-a-tener-en-promedio-un-smartphone-por-habitante/>
- ❖ Figura 2.12. Elaboración propia (2021). *Cantidad de teléfonos inteligentes vendidos a usuarios finales en todo el mundo desde 2007 hasta 2021*. [Gráfica]. Datos tomados de: (Statista, 2021).
- ❖ Figura 2.13. PASE. (2019). *Componentes de un teléfono inteligente*. [Gráfica]. Recuperado de [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_A\\_New\\_Circular\\_Vision\\_for\\_Electronics.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf)
- ❖ Figura 2.14. Elaboración propia (2021). *Televisor CRT*. [Imagen].
- ❖ Figura 2.15. Ohmygeek (2015) *Televisión LCD*. [Imagen] Recuperado de <https://ohmygeek.net/2015/12/22/televisores-crt-plasma-led-oled-lcd/>

- ❖ Figura 2.16. Ohmygeek (2015) *Televisión plasma*. [Imagen] Recuperado de <https://ohmygeek.net/2015/12/22/televisores-crt-plasma-led-oled-lcd/>
- ❖ Figura 2.17. Coppel. (2021). *Televisión Oled*. [Imagen]. Recuperado de <https://cdn1.coppel.com/images/catalog/pm/2307293-1.jpg>
- ❖ Figura 2.18. UERDA. (2020). *Televisiones analógicas en la basura*. [Imagen]. Recuperado de <https://www.werbasa.com/es/gestion-reciclaje-monitores-crt>
- ❖ Figura 2.19. ecoinnovación. (2020). *Relleno sanitario improvisado*. [Imagén]. Recuperado de <https://www.atriainnovation.com/reciclaje-industrial-de-desechos-electricos-y-electronicos-e-waste/> .
- ❖ Figura 2.20. Elaboración propia (2021). *Crecimiento poblacional de México*. [Gráfica].
- ❖ Figura 2.21. Elaboración propia (2021). *Crecimiento de los RAEE en México*. [Gráfica].
- ❖ Figura 2.22. nicepng. (2018). *Ejemplo de diferentes tipos de metales en un teléfono móvil*. [Imagen]. Recuperado de [https://www.nicepng.com/ourpic/u2w7i1a9e6i1y3y3\\_of-the-over-30-metals-in-your-cell/](https://www.nicepng.com/ourpic/u2w7i1a9e6i1y3y3_of-the-over-30-metals-in-your-cell/)
- ❖ Figura 2.23. Elaboración propia (2021). *Economía circular*. [Gráfica].
- ❖ Figura 2.24. Prince, A. (2006). *Ley de la basura electrónica*. [Imagen]. Recuperado de <https://www.monografias.com/trabajos-pdf5/latinoamerica-verde-basura-electronica/latinoamerica-verde-basura-electronica.shtml>
- ❖ Figura 2.25. Donde reciclo. (2018). *Ghana*. [Imagen] Recuperado de (<https://www.dondereciclo.org.ar/blog/5775-2/> )
- ❖ Figura 2.26. Intralogística. Cristina, A., (2019). *Residuos peligrosos*. [Imagen]. Recuperado de, <http://intralogistica.es/?p=558>
- ❖ Figura 2.27. RETEMA. (2017). *Clasificación*. [Imagen]. Recuperado de, <https://www.retema.es/noticia/soluciones-para-la-separacion-y-clasificacion-de-plasticos-de-residuos-de-aparatos-el-0tc6L>
- ❖ Figura 2.28. 123RF. (2018) *Aparatos de intercambio de temperatura* [Imagen]. Recuperado de [https://es.123rf.com/photo\\_58060896\\_electrodom%C3%A9sticos-y-equipos-sistema-de-aire-acondicionado-acondicionados-refrigeradores-y-mandos-a-dis.html](https://es.123rf.com/photo_58060896_electrodom%C3%A9sticos-y-equipos-sistema-de-aire-acondicionado-acondicionados-refrigeradores-y-mandos-a-dis.html)
- ❖ Figura 2.29 Usera, J. (2019) *Monitores*. [Imagen]. Recuperado de <https://hardzone.es/reportajes/comparativas/monitores-crt-vs-tft-gaming/>
- ❖ Figura 2.30 El PAÍS (2017) *Focos*. [Imagen]. Recuperado de, [https://elpais.com/economia/2017/02/01/actualidad/1485950354\\_129100.htm](https://elpais.com/economia/2017/02/01/actualidad/1485950354_129100.htm)

- ❖ Figura 2.31 Mexis (2016) *Aparatos grandes*. [Imagen]. Recuperado de <http://www.mexis.com.mx/cuando-un-servidor-fisico-es-la-mejor-opcion/index.html>
- ❖ Figura 2.32 Herramienta Electrónica (2019) *Aparatos pequeños*. [Imagen]. Recuperado de <https://herramientaelectronica.com/2019/03/21/introduccion-a-la-herramienta-electronica-basica/>
- ❖ Figura 2.33. Merindad (2018) *Equipos de informática y telecomunicaciones*. [Imagen]. Recuperado de <http://merindad.com/campana-de-recogida-de-equipos-informaticos-obsoletos/>
- ❖ Figura 2.34. UNTHA. (2020). *Trituración de materiales valiosos*. [Imagen]. Recuperado de <https://www.untha.com/es/aplicaciones/residuos-electronicos>
- ❖ Figura 2.35. Anales sectoriales. (2017). *Separación de materiales*. [Imagen]. Recuperado de, <https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/181287-Conceptos-basicos-de-la-separacion-magnetica.html>
- ❖ Figura 2.36. Ambisort. (2021). *Separación por aire*. [Imagen]. Recuperado de <https://ambisort.com/separacion-por-aire/>
- ❖ Figura 2.37. Anales sectoriales. (2016). *Refrigeración criogénica*. [Imagen]. Recuperado de, <https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/181287-Conceptos-basicos-de-la-separacion-magnetica.htm>
- ❖ Figura 2.38 Bolívar, Gabriel. (2019). *Proceso de calcinado*. Recuperado de <https://www.lifeder.com/calcinacion/>
- ❖ Figura 2.39. Tecnología de los plásticos (2011) *Extrusión de materiales plásticos*. [Imagen].
- ❖ Figura 2.40. ISASIT (2018) *Clasificación de residuos peligrosos*. Recuperado de <https://www.facebook.com/CecilioESegura/photos/este-es-el-acr%C3%B3nimo-de-clasificaci%C3%B3n-de-las-caracter%C3%ADsticas-a-identificar-en-los/2615017475208979/> [Imagen].
- ❖ Figura 2.41. Elaboración propia (2022) *Diagrama de logística*. [Gráfica]
- ❖ Figura 3.1. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados de 2014 a 2019 en el mundo*. [Gráfica]. Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 3.2. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados por habitante de 2014 a 2019 en el mundo*. [Gráfica]. Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 3.3. Elaboración propia. (2021). *Predicción de RAEE generados en el mundo de 2014 a 2030*. [Gráfica].

- ❖ Figura 3.4. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados de 2015 a 2020 en México*. [Gráfica]. Datos tomados de: (Gobierno de México, 2020).
- ❖ Figura 3.5. Elaboración propia. (2021). *Predicción de RAEE generados en México de 2015 a 2030*. [Gráfica].
- ❖ Figura 3.6. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados por 180 países en 2019*. [Mapa]. Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 3.7. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados por continente en 2019*. [Gráfica]. Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 3.8. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados por habitante por continente en 2019*. [Gráfica]. Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 3.9. Elaboración propia. (2021). *Población por continente*. [Gráfica]. Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 3.10. Elaboración propia. (2021). *RAEE recogidos y reciclados por continente*. [Gráfica]. Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 3.11. Elaboración propia. (2021). *Método del codo*. [Gráfica]. Datos de INECC, 2013
- ❖ Figura 3.12. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados por grupo*. [Gráfica].
- ❖ Figura 3.13. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados por habitante por grupo*. [Gráfica].
- ❖ Figura 3.14. Elaboración propia. (2021). *Población por grupo*. [Gráfica].
- ❖ Figura 3.15. Elaboración propia. (2021). *RAEE recogidos y reciclados por grupo*. [Gráfica].
- ❖ Figura 3.16. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados en 2016 y 2019 por los países que más RAEE generan*. [Gráfica]. Datos tomados de: (Baldé et al., 2017 y 2020).
- ❖ Figura 3.17. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados en 2016 y 2019 por habitante por los países que más RAEE generan*. [Gráfica]. Datos tomados de: (Baldé et al., 2017 y 2020).
- ❖ Figura 3.18. Elaboración propia. (2021). *Población de los países que más RAEE generan*. [Gráfica]. Datos tomados de: (Baldé et al., 2017 y 2020).
- ❖ Figura 3.19. Elaboración propia. (2021). *Método del codo*. [Gráfica].
- ❖ Figura 3.20. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados 2016 por grupo*. [Gráfica].
- ❖ Figura 3.21. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados 2019 por grupo*. [Gráfica].

- ❖ Figura 3.22. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados por habitante 2016 por grupo*. [Gráfica].
- ❖ Figura 3.23. Elaboración propia. (2021). *RAEE generados por habitante 2019 por grupo*. [Gráfica].
- ❖ Figura 3.24. Elaboración propia. (2021). *Población por grupo*. [Gráfica].
- ❖ Figura 3.25. Elaboración propia (2021). *RAEE generados en Europa 2019*[Mapa]. (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 3.26. Elaboración propia (2021). *RAEE generados en Asia 2019* [Mapa]. (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 3.27. Elaboración propia (2021). *RAEE generados en África 2019* [Mapa]. (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 3.28. Elaboración propia (2021). *RAEE generados en América 2019* [Mapa]. (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 3.29. Elaboración propia (2021). *RAEE reciclados por continente 2019* [Gráfica]. (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 3.30. Elaboración propia (2021). *Países con reglamentación sobre RAEE* [Mapa]. (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 3.31. Elaboración propia (2021). *Países sin reglamentación sobre RAEE* [Mapa]. (Baldé et al., 2020).
- ❖ Figura 4.1. Elaboración propia (2021). *Fases del proceso del manejo integral*. [Gráfica].
- ❖ Figura 4.2. Ulloa S.A. (2020). *Recolección y transporte*. [Imagen]. Recuperado de <https://ulloaperu.com/gestion-integral-de-residuos/recoleccion-y-transporte-de-residuos-solidos/>
- ❖ Figura 4.3. Elaboración propia (2021). *Procesos de recolección*. [Gráfica].
- ❖ Figura 4.4. Luis, H. (2017). *Recepción y almacenamiento*. [Imagen]. Recuperado de <https://lhconsultingsite.wordpress.com/2017/04/26/gestion-de-almacenes-parte-1/>
- ❖ Figura 4.5. Tecnologías de reciclaje. (2010). *Desmontaje y separación*. [Imagen]. Recuperado de <http://tecnologiavtecnologia.blogspot.com/p/desmontaje-y-separacion-manual.html>
- ❖ Figura 4.6. Elaboración propia (2021). *Mezcla de ácidos*. [Imagen].
- ❖ Figura 4.7. Elaboración propia (2021). *Mezcla ácida*. [Imagen].

- ❖ Figura 4.8. Diario Norte. (2017). *Metales*. [Imagen]. Recuperado de, <https://www.diarionorte.com/157688-los-metales-preciosos>
- ❖ Figura 4.9. Fundición BIR. (2021). *Refinamiento*. [Imagen]. Recuperado de <https://fundicionbir.com.mx/>
- ❖ Figura 4.10. SN. (2018). *Procesos pirometalúrgicos*. [Imagen]. Recuperado el 13 de enero de 2020, de <https://ecnautomation.com/procesos-pirometalurgicos-conceptos/>
- ❖ Figura 4.11. América economía. (2018). *Venta de la materia prima reciclada*. [Imagen]. Recuperado de <https://www.americaeconomia.com/economia-mercados/venezuela-comenzara-este-lunes-venta-de-certificados-de-ahorro-en-oro>
- ❖ Figura 4.12. MINAMBIENTE (2017). *Economía circular de los RAEE*. [Gráfica]. Recuperado de [https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/e-book\\_rae\\_/contenido\\_5\\_1.html](https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/e-book_rae_/contenido_5_1.html)
- ❖ Figura 4.13. Elaboración propia (2021). Tarjetas RAM, video y sonido. [Imagen].
- ❖ Figura 4.14. Elaboración propia (2021). Gabinetes. [Imagen].
- ❖ Figura 4.15. Elaboración propia (2021). Herramientas y procesadores. [Imagen].
- ❖ Figura 4.16. Elaboración propia (2021). Pines desmontados. [Imagen].
- ❖ Figura 4.17. Elaboración propia (2021). Vaso sobre un calentador magnético. [Imagen].
- ❖ Figura 4.18. Elaboración propia (2021). Procesos del experimento. [Gráfica].
- ❖ Figura 4.19. Elaboración propia (2021). Oro en papel filtro recuperado. [Imagen].
- ❖ Figura 4.20. Elaboración propia (2021). Material de pines de tarjetas. [Imagen].
- ❖ Figura 4.21. Sreetips. (2015). Tarjetas en mezcla ácida. [Imagen].

## Lista de acrónimos:

- ❖ AEE- Aparatos Eléctricos y Electrónicos.
- ❖ ARF- Tarifas de reciclaje avanzadas
- ❖ CANIETI- Cámara Nacional de la Industria Electrónica, de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información.
- ❖ CATWOE- Clientes, Actores, Transformación, Weltanschauung, Propietario, Ambiente.
- ❖ CA- Corriente alterna
- ❖ CD- Corriente directa
- ❖ COFETEL- Comisión Federal de Telecomunicaciones.
- ❖ CRM- Administración de la Relación con el Cliente.
- ❖ COP- Contaminantes organicos persitentes.
- ❖ CPU - Central Processing Unit.
- ❖ CRT - Cathode ray tube.
- ❖ ERP- Responsabilidad extendida del productor
- ❖ EUA- Estados Unidos de América
- ❖ EMPA- Laboratorio Federal de Prueba de Materiales y de Investigación (Suecia).
- ❖ EPRON- Organización de responsabilidad de residuos electrónicos
- ❖ IoT- Internet de las cosas
- ❖ INET- Instituto nacional de ecología y cambio climático
- ❖ INEGI- Instituto nacional de estadística y geografía
- ❖ LA- Latinoamérica.
- ❖ LCD - Liquid crystal display.
- ❖ MCA- Minería a cielo abierto.
- ❖ MSS- Metodología de Sistemas Suaves.
- ❖ Mt- Millones de toneladas métricas

- ❖ MP-Metales preciosos.
- ❖ MXN- Peso mexicano.
- ❖ NESREA-Nacional para la Reglamentación y la Aplicación de las Normas Ambientales.
- ❖ NTCRS National Television and Computer Recycling Scheme
- ❖ OCDE- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.
- ❖ ODS-Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- ❖ PBB- Los Bifenilos Policromados.
- ❖ PCB- Los Bifenilos Policlorados.
- ❖ PCT- Los Terfenilos Policlorados.
- ❖ PNUMA- Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- ❖ PT- Producto terminado.
- ❖ PROFEPA-Procuraduría federal de protección al ambiente.
- ❖ GPS- Global Position System
- ❖ LPEGIR-Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos.
- ❖ RAEE- Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos.
- ❖ RE- Residuo Electrónico.
- ❖ REP- Responsabilidad Extendida del Productor.
- ❖ RME-Residuos de Manejo Especial.
- ❖ SEDEMA- Secretaría del medio ambiente de la ciudad de México
- ❖ SEMARNAT- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- ❖ RSU- Residuo Sólido y Urbano.
- ❖ TIC- Tecnología de la Información y Computación.
- ❖ UE- Unión Europea
- ❖ UNAM-Universidad Nacional Autónoma de México.
- ❖ UNESCO- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

- ❖ UE- Unión Europea.
- ❖ USD- Dólar estadounidense.
- ❖ VAE- Viejos Aparatos Electrónicos. WIP- Trabajo en Proceso.

# Capítulo I Introducción

---

## 1. Capítulo I Introducción

Los Aparatos Eléctricos Electrónicos (AEE) son parte de la vida cotidiana en la sociedad moderna, aumentando su uso cada año y generando desechos en todos los países, los cuales son conocidos como Residuos de Aparatos Eléctricos Electrónicos (RAEE). Dependiendo del país o de las organizaciones, tanto gubernamentales como no gubernamentales, tienen diferentes definiciones, pero es posible definirlos como residuos tecnológicos de aparatos eléctricos electrónicos, que provienen de la industria, alcanzando el fin de su vida útil por uso o por obsolescencia y que se convierten en residuos. (Baldé et al., 2017).

Por ello el objetivo principal de esta tesis es generar una propuesta para el manejo integral de los RAEE en México, tomando como base a un análisis de datos sobre diferentes países en cuanto a la generación y reciclaje de estos residuos; el manejo de los impactos más relevantes que los engloban; y considerando las leyes y normativas aplicadas en otros países, comparándolas con México, para el manejo de los RAEE.

Al tener una correcta planificación de la gestión de los RAEE, incluyendo su reciclaje, es posible disminuir el impacto contaminante que generan, tanto ambiental como en la salud de las personas, además de hacer un cambio en la economía, pasando de una lineal (producción, consumo, residuos) a una economía circular (producción, consumo, reutilización, producción.).

En el **capítulo II** se aborda el marco teórico de los conceptos y antecedentes que abarcan a la minería electrónica desde un punto de vista en el que se favorece esta práctica para recuperar materiales valiosos de los RAEE.

Se presenta una introducción al análisis de datos para implementarlo en el capítulo posterior, se explica la obsolescencia para entender por qué se desechan estos residuos; Una clasificación de los RAEE, así como los componentes y materiales que componen a las computadoras, celulares y televisiones con el fin de comprender su estructura y proponer el reciclaje de estos.

También se abordan los principales impactos a la salud, ambientales, económicos, sociales y políticos que generan los RAEE, las opciones que representa la economía circular (segundo uso, reutilización, reparación, y reciclaje) para disponer estos residuos; El marco legal nacional e internacional considerando los convenios internacionales. Terminando el capítulo con el panorama general de lo que es un plan de manejo y de qué son las metodologías de logística inversa y sistemas suaves.

En el **capítulo III** se justifica la necesidad de tener un plan de manejo integral de los RAEE realizando la implementación del análisis de datos sobre diferentes conjuntos de datos abiertos, aplicando los algoritmos de regresión lineal y agrupación (k-means) para poder analizar, cuantificar, agrupar, encontrar patrones de consumo y hacer predicciones a futuro del comportamiento de estos residuos, así como el análisis descriptivo de este.

Además, se expone una comparativa de países con y sin legislación en el reciclaje de los RAEE para poder reflejar las diferencias que conlleva el tener o no tener leyes y normativas suficientes para el manejo de estos residuos. Por último, se presentan propuestas de normativas que se pueden implementar por el gobierno para que se pueda dar un correcto manejo de los RAEE.

En el **capítulo IV** se plantea el plan de manejo integral para los RAEE, de manera que se desarrolla la estrategia a seguir del proceso de reciclaje de estos residuos, explicando cada etapa que este conlleva (Recolección y transporte; recepción y almacenamiento; desmontaje y separación; técnicas de tratamiento; refinamiento y reincorporación de la materia prima al ciclo productivo.) y sus recomendaciones respectivas. Finalmente se propone la experimentación utilizando el método de mezcla ácida para la obtención de oro en computadoras de sus componentes, como pines y tarjetas.

En el **Capítulo V** se comentan las conclusiones de la propuesta planteada, con sus ventajas y desventajas, así como la manera en que se satisfacen los objetivos y se discuten los posibles trabajos a futuro que se pueden realizar.

## ***1.1. Planteamiento del problema***

Gracias al avance tecnológico de la actualidad, se producen cada vez más bienes que a su vez se vuelven más sofisticados, como lo son los AEE; sin embargo, esto ha resultado en la generación sin medida de residuos, siendo ya un problema presente que a futuro puede tener graves consecuencias si no se lleva a cabo un correcto manejo de estos, como el agotamiento de los recursos no renovables, la contaminación ambiental y daños a la salud de las personas, a causa de los componentes tóxicos que se encuentran en estos residuos. (Baldé et al., 2020).

Debido a la falta de una infraestructura sólida para el reciclaje y de una conciencia ecológica colectiva mayor se dispone de estos RAEE como si fueran cualquier otro residuo sólido urbano, de manera que la responsabilidad acaba recayendo en gran medida en el consumidor, ya que no suele haber una del productor. Y en su mayoría es el mismo consumidor el que determina el final de la vida útil de estos aparatos, en parte debido a los diferentes tipos de obsolescencias, desechando productos de los que se desentiende, desaprovechando los recursos tirados y llegará un punto de inflexión en donde ya no se podrán fabricar componentes por la escasez de materia prima, así como también el daño irreparable que puede ocasionarse en el medio ambiente. (ACRR. 2002).

Por ello es importante hacer conciencia tanto en los productores como en los consumidores del impacto ambiental y los riesgos a la salud que generan los RAEE sin el correcto tratamiento de estos, de manera que se necesita fomentar el reciclaje llegando a un resultado beneficioso para todos, ya que al momento de reciclar se recupera la materia prima que suele ser desechada y que aún es funcional, como los metales preciosos, llegando a un punto donde es más factible cambiar el modelo económico, de uno lineal a uno circular, regresando la materia prima recuperada al productor. (Rezagos, 2020).

Además, México carece de leyes y normativas que logren gestionar adecuadamente el tratamiento de los RAEE en el país, a pesar de los convenios internacionales en los que participa (Convenios de Basilea y Estocolmo), de manera que es necesario ampliar o actualizar las normativas existentes y crear leyes nuevas para ello, ya que en el país se generan millones de toneladas de estos residuos anualmente y, sin embargo, el porcentaje de RAEE que es tratado correctamente es muy bajo. (Lira, I., 2016).

Es necesario plantear una propuesta de manejo que sea integral, abarcando los aspectos más importantes, desde su recolección y transporte, hasta la reincorporación de la materia prima, así como las medidas para disminuir los impactos ambientales, para aprovechar los RAEE, puesto que es posible extraer materia prima valiosa. (Baldé et al., 2020).

## ***1.2. Objetivo general***

Generar una propuesta para el manejo integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) en México, considerando el reciclaje para la recuperación de oro.

## ***1.3. Objetivos específicos***

- Realizar una investigación bibliográfica, en medios electrónicos e impresos, sobre los RAEE en México y en el mundo, para el conocimiento de su situación actual.
- Sistematizar los RAEE considerando la información sobre las problemáticas en México para la identificación de los impactos más relevantes.
- Clasificar de manera óptima los RAEE con base en las existentes, para su manejo dentro del proceso de reciclaje.
- Analizar la normatividad nacional e internacional de los RAEE, en medios electrónicos e impresos, para percatarse de las que han funcionado mejor e introducirlas en México.
- Determinar las diferentes etapas para la recuperación de materiales con valor económico mediante el proceso de reciclaje.
- Plantear la experimentación para la recuperación de oro a partir de componentes de computadoras, con base en experimentos previos, para la implementación en el proceso de reciclaje.

#### ***1.4. Alcances y limitaciones***

- Se investigarán los conceptos más importantes de la minería electrónica, los AEE, los RAEE y el reciclaje.
- Se analizarán los impactos que generan los RAEE a la salud, ambientales, económicos, sociales y políticos.
- Se investigará el marco legal internacional y nacional que existe, así como los convenios internacionales que regulan los RAEE.
- Se llevará a cabo un análisis de datos con datos abiertos, provistos por diferentes entidades gubernamentales, aplicando los algoritmos de regresión lineal y agrupamiento (k-means).
- El plan de manejo es una propuesta, basada en el análisis de datos realizado, en las normativas de residuos peligrosos y en propuestas ya implementadas por algunos países.
- Para la propuesta del plan de manejo queda como trabajo a futuro ponerla a prueba en la vida real en un caso de estudio para determinar su efectividad.
- Para el caso de experimentación se considerarán los pines de las tarjetas electrónicas y los procesadores de las computadoras, para recuperar únicamente el oro.
- Para los materiales utilizados en el experimento expuesto se contará con un número limitado de computadoras desechadas, por lo cual no será posible hacer múltiples pruebas, así como múltiples métodos.

## **Capítulo II Marco teórico**

---

## **2. Capítulo II Marco teórico**

Es necesario comprender qué son los RAEE, así como los diferentes factores que engloban y que se relacionan con estos, para ello en este capítulo se presenta una investigación exhaustiva y sistematizada sobre los conceptos más relevantes de la minería electrónica, con una introducción al análisis de datos que se implementará en el siguiente capítulo; los AEE y RAEE con su clasificación; los impactos generados por estos residuos en diferentes ámbitos; un panorama del marco legal nacional e internacional de estos; qué es un plan de manejo y las metodologías de logística inversa y sistemas suaves. Con el fin de saber cómo desarrollar un plan de manejo de los RAEE, abordando la complejidad que conllevan estos residuos, así como presentar la necesidad de ello.

### ***2.1. Minería electrónica***

La Minería Electrónica también conocida como “Minería Urbana” consiste en extraer minerales de los Residuos de Aparatos Eléctricos Electrónicos (RAEE), siguiendo una serie de etapas por las cuales estos residuos son separados y reciclados para recuperar materia prima valiosa, como lo son los metales preciosos. (ACS Recycling, 2021).

También el término minería electrónica describe a la acción de buscar en los residuos electrónicos con el fin de recuperar materiales para ser reutilizados, siendo una actividad con un margen alto de ganancia y productividad en los países donde se practica. (Namias, J., 2013).

Para la minería electrónica no importa si el dispositivo está funcionando, está roto o descompuesto, si es nuevo o viejo, lo que importa es su contenido, por ejemplo, los minerales, metales valiosos y otros elementos como el cobre, hierro, manganeso, níquel, zinc, entre otros. Después de que los dispositivos son procesados y los materiales separados, estos metales valiosos pueden venderse como materias primas de buena calidad, utilizados para construir nuevos productos, que a su vez algún día podrían ser reciclados. (ACS Recycling, 2021).

La minería urbana está estrechamente relacionada con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 12, referido a los patrones de producción y consumo sostenibles. También con el ODS 8, sobre trabajo decente y crecimiento económico; con el ODS 3, sobre buena salud y bienestar; con el ODS 6, sobre desechos limpios y saneamiento; y con el ODS 14, sobre la vida submarina.

Los ODS son impulsados por las Naciones Unidas para dar seguimiento a la agenda de desarrollo buscando alcanzar los Objetivos de Desarrollo del Milenio. (Baldé et al., 2020).

El reciclado y recuperación de materia prima de los RAEE tiene grandes beneficios en comparación con la minería tradicional en términos de uso de la tierra, de empleo de energía, propagación de sustancias peligrosas, aumento de residuos y emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Para dar una idea, la generación de 1 kg de aluminio al reciclar usa sólo un 10% de la energía necesaria para la producción primaria, y evita que se genere 1.3 kg de residuos de bauxita, 17.2 kg de emisiones de CO<sub>2</sub> y 0.011 kg de transmisión de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), además reduce los impactos y las emisiones asociadas con la generación de los elementos de aleación en el aluminio, sin pérdidas del valor de la materia (ACS Recycling, 2021).

En la tabla 2.1 se observan algunos ejemplos en que se pueden utilizar los materiales recuperados del reciclaje de los RAEE y por lo tanto los beneficios en los que se puede aprovechar la minería electrónica:

Tabla 2.1. Aprovechamiento de materiales recuperados

<b>Materiales recuperados</b>	<b>Aprovechamiento</b>
<b>Metales ferrosos</b>	Pueden ser fundidos para la creación de nuevas estructuras o la creación de productos diversos.
<b>Metales no ferrosos</b>	Utilizados para la creación de productos diversos.
<b>Polietileno de alta densidad</b>	Puede ser utilizado para la elaboración de productos diversos como embalaje, mobiliario urbano, entre otros.
<b>Polietileno de baja densidad</b>	Puede ser utilizado para la elaboración de productos diversos como film para bolsas, tubería, mangueras, aislamiento para cables, entre otros.
<b>Metales preciosos, raros y pesados</b>	Oro y plata, se encuentran en un porcentaje relativamente bajo con respecto al peso total, estos son muy importantes por su valor en gramos.
<b>Vidrio</b>	Se realiza la fundición de la padecería de vidrio para la elaboración de nuevos envases.

(Elaboración propia, 2021)

### ***2.1.1. Los RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos)***

Los Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) en las últimas décadas se han convertido en parte esencial de la vida cotidiana, debido a su vasta disponibilidad y uso generalizado, esto ha generado que gran parte de la población del mundo pueda aumentar su calidad de vida; No obstante, la manera de producir, consumir y desechar los RAEE no puede mantenerse, a causa de una lenta acogida de los procesos de recolección y reciclaje, por lo anterior una gran cantidad de países se ven afectados por los graves riesgos para el medio ambiente y la salud de las personas que solo evidencia un mal plan de manejo de los RAEE. (Baldé et al., 2020).

Los AEE se transforman en RAEE una vez que su dueño los desecha sin intención de volver a utilizarlos. Estos abordan una extensa variedad de productos equipados de componentes de circuitos eléctricos y una fuente de alimentación. En la mayoría de las empresas y hogares se usan productos como electrodomésticos para la cocina, baño, entretenimiento, y dispositivos de TIC (teléfonos móviles, ordenadores portátiles, entre otros). (Baldé et al., 2020).

Además del uso doméstico y comercial cotidiano, los AEE desempeñan un papel cada vez más importante en los ámbitos del transporte, la salud, para las redes de seguridad y los productores de energía, como los paneles fotovoltaicos. Incluso los productos tradicionales, como prendas de vestir y muebles, vienen algunas veces equipados de componentes eléctricos, también los AEE están ganando importancia en el sector de la Internet de las cosas (IoT), en particular en los sensores o dispositivos utilizados con el concepto de "hogar inteligente" o "ciudad inteligente" y, por consiguiente, contribuyen progresivamente a la generación de RAEE a nivel mundial. (Baldé et al., 2020).

Dichos aparatos son posibles encontrar en las empresas y hogares de todo el planeta. Sin embargo, el número de dispositivos en propiedad per cápita varía en función del nivel de ingresos, como se puede observar en la figura 2.1, de lo cual se puede concluir que en los hogares con mayores ingresos, son en promedio los que tienen menos integrantes, pero son los que más electrodomésticos consumen, por ejemplo en el número lámparas, deduciendo que cuentan con casas más grandes. (Baldé et al., 2020).

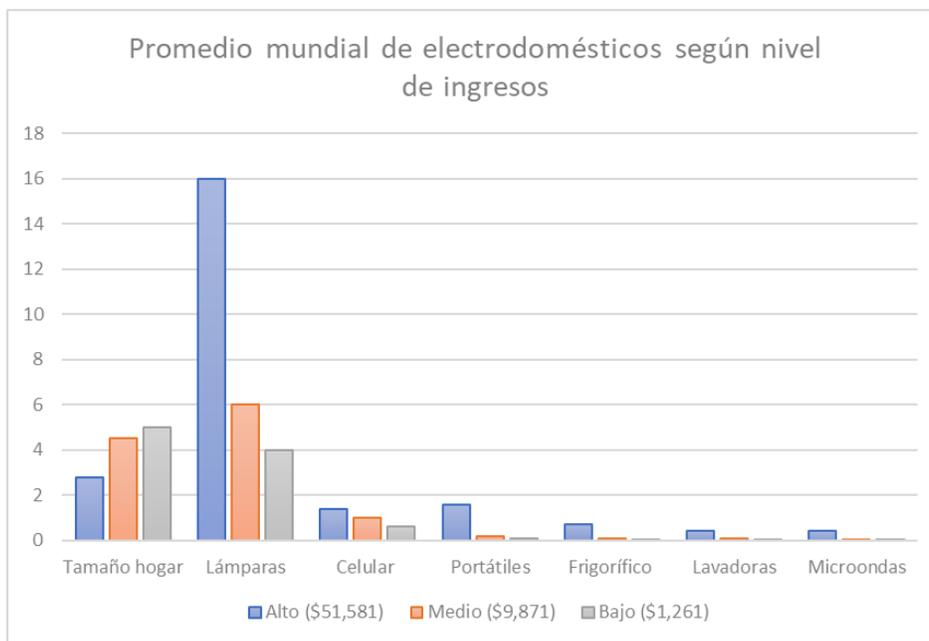


Figura 2.1. Promedio mundial de electrodomésticos según el nivel de ingresos, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

Además, de la figura 2.1 se puede destacar que el nivel de ingresos refleja el desarrollo de algunos países, que concuerda con el análisis realizado en el capítulo III y es causa directa de una mayor generación de RAEE. Por lo que a medida que se industrialice un país este debe de tomar en cuenta los efectos secundarios que esto genera, mitigando estos efectos, como Europa que produce una gran cantidad de RAEE, pero también es donde más se recicla.

Es relevante conocer la diferencia entre aparatos eléctricos y aparatos electrónicos, la cual radica principalmente en los voltajes que manejan, así como en los componentes que los conforman, de tal manera un aparato eléctrico es aquel que utiliza un voltaje de 120V A.C., y generalmente utiliza generadores o bobinas, como una plancha, lavadora, un taladro, etc. Un aparato electrónico es aquel que maneja voltajes que pueden ir desde 5V C.D. a 24V C.D., están compuestos por resistencias, capacitores, bobinas, cristales, circuitos integrados y placas base, como los radios, televisores, computadoras, etc. (Namias, J., 2013).

### ***2.1.2. Introducción al análisis de datos***

Cada año en el mundo se generan millones de toneladas métricas de basura electrónica, donde cada país genera en diferentes cantidades que depende de diversos factores, como su población, qué tan urbanizado e industrializado está, niveles de ingresos disponibles de sus habitantes y si tiene leyes que ayuden o regulen el tratamiento de estos residuos.

Para poder comprender de mejor manera la situación general de los RAEE en el mundo y en México, así como la problemática que presentan y los beneficios de realizar minería electrónica, en el capítulo III se implementa un análisis de la información obtenida en diferentes conjuntos de datos, aplicando algoritmos enfocados al análisis de datos con ayuda del lenguaje de programación Python y utilizando Power BI para representar gráficamente la información obtenida.

Se implementaron algoritmos de regresión lineal y agrupamiento K-means para el análisis de datos, para ello se usó la librería de Python “Scikit-learn (Sklearn)” que proporciona una selección de herramientas eficientes para el aprendizaje automático y el modelado estadístico que incluyen clasificación, regresión, agrupación y reducción de dimensionalidad. (Scikit-learn, 2019).

#### ***➤ Regresión lineal***

La regresión lineal consiste en generar un modelo (ecuación de una recta) que ayuda a explicar la relación lineal que existe entre dos variables. Este modelo de regresión lineal se puede entender de acuerdo la ecuación:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \epsilon.$$

Siendo  $\beta_0$  la ordenada en el origen,  $\beta_1$  la pendiente y  $\epsilon$  el error aleatorio.

A la variable dependiente o respuesta se le identifica como “Y” y a la variable predictora o independiente como “X”. (USC, 2012).

#### ***➤ Agrupamiento K-Means***

El algoritmo K-means es utilizado en la industria para crear “k” grupos a partir de un conjunto de datos, de modo que los miembros de un clúster sean similares. Es un algoritmo particional, es decir, divide los datos en un número de grupos sin atender a una estructura jerárquica, ayuda a una comprensión cualitativa y cuantitativa de grandes cantidades de datos. Funciona de forma iterativa, dividiendo óptimamente el conjunto inicial de datos en un número k de grupos, el cual se indica como parámetro. (Cáceres, J. H., 2015).

La implementación y resultados del análisis de datos utilizando los algoritmos anteriormente mencionados se encuentran en el capítulo III.

### ***2.1.3. Minería electrónica en México***

México es el segundo productor de basura electrónica en América Latina, después de Brasil, y como ha sido mencionado la tasa de crecimiento solo irá aumentando año tras año la cantidad total. Además, faltan campañas nacionales para reciclar y en las empresas, universidades y oficinas se tiende a acumular equipo inservible, ya que no tienen políticas de donación o desechos bien implementadas.

Las empresas que existen, civiles u organismos gubernamentales, que se dedican a la minería electrónica en México son:

- **RECUPERA:** La empresa surge en los años 40, especializada en la comercialización y manejo de materiales reciclables, así como la fabricación de productos reciclados. Los materiales que pueden llevar a los centros de Recupera son los siguientes: (RECUPERA, 2018).
  - *Metales:* Aluminio, bronce, latón, plomo y chatarra en general.
  - *Electrónicos:* Equipo de cómputo, servidores, celulares, discos duros, tarjetas electrónicas, etc.
  - *Otros:* Baterías de autos, radiografías, botellas de vidrio, cartón, botellas de agua de alta y baja densidad, revistas, libros, etc.
- **REMSA:** Es una empresa dedicada a fomentar el correcto reciclaje de los AEE, difundiendo información de las consecuencias de los RAEE. Mediante acciones ofrece una solución segura para depositar los RAEE que ya no se necesitan y que podrán integrarse después de diferentes etapas de procesos de recuperación adecuadas, evitando que los componentes de estos residuos electrónicos generan contaminación, y poder mitigar el impacto ecológico de explotar los recursos naturales que se necesitan para producir nuevos equipos. (Pineda, 2015).

En sus centros de recuperación se pueden recibir estos residuos: Celulares, “Palm”, “iPods”, Computadoras, Impresoras, Copiadoras, Discos duros, Laptops, Teclados, “mouses”, etc. (REMSA, 2018).

- **ECORECIKLA:** Es la única planta en Latinoamérica que recicla componentes electrónicos mediante procesos industriales de clase mundial. Su fundador es Francisco Sánchez García, un ingeniero en electrónica por el Tecnológico de Chihuahua, que supervisa plantas de reciclaje en países como Estados Unidos, Canadá, Taiwán, Corea, Japón, China y Hong Kong. (ECORECIKLA, 2018).

La Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) figura 2.2, ha encontrado una manera de recuperar y aprovechar los RAEE, impidiendo que lleguen a botaderos clandestinos los aparatos electrónicos que han dejado de funcionar, creando hábitos de separación y reciclaje con trayectos llamados Recicladrón.

- *Recicladrón*: Es una jornada de recuperación de los RAEE que se realiza con la participación de los ciudadanos, las empresas y las diferentes instituciones u organizaciones civiles, y tiene el propósito que se ejerza una disposición adecuada de estos residuos, se realiza el acopio de los RAEE cada mes en diversos lugares de la Ciudad de México.

Los residuos de los AEE que se recuperan en el Recicladrón se llevan a la empresa Recupera que se encuentra en la ciudad de México temporalmente. Inmediatamente se trasladan a la empresa de reciclaje llamada Cali Resources S.A de C.V. ubicada en Tijuana, Baja California (SEDEMA, 2021).



Figura 2.2. Logo SEDEMA, (SEDEMA, 2021)

Los materiales que se recuperan en esta planta de reciclaje son: tarjetas electrónicas, tubo de rayos catódicos (CRT), unidades de procesamiento de datos, monitores LCD, equipo de cómputo, plásticos, materiales ferrosos y materiales no ferrosos. En cada Recicladrón, se organiza en 4 categorías (A, B, C, D, E), tabla 2.2, con finalidad de gestionar los RAEE de una manera adecuada.

Tabla 2.2. Categorías de los RAEE en el Reciclación

<b>Categoría tipo A</b>	Teclados, impresoras, miniconsolas, teléfonos fijos, teléfonos inalámbricos, licuadoras, planchas, secadoras de cabello, proyectores, etc.
<b>Categoría tipo B</b>	Laptops, CPU's, monitores, televisiones, etc.
<b>Categoría tipo C</b>	Celulares y pilas.
<b>Categoría tipo D</b>	Cargadores, cables, discos y películas.
<b>Categoría tipo E</b>	Balasta, pilas alcalinas, transformadores, lámparas.

(SEDEMA, 2021)

#### **2.1.4. Obsolescencia**

Es importante también mencionar que existen razones que motivan el recambio de un AEE como los celulares, computadoras o televisores, conocidas como obsolescencias, de manera que actualmente, un celular tiene una vida útil de menos de 2 años mientras que en el caso de una computadora, es de menos de 5 años, y la de los televisores no mayor de 8 años. Hay varios tipos de obsolescencia. (Estévez, R., 2014)

- *Obsolescencia real*: Cuando los objetos dejan de funcionar por el paso de mucho tiempo o se descomponen.
- *Obsolescencia programada*: También conocida como “diseño para el basurero” Figura 2.3. Es la estrategia mediante la cual la industria orienta el diseño y la producción de productos para que sean utilizados por un período de tiempo específico. Es la manera en que un fabricante reduce el ciclo de vida de un producto ocasionado que el consumidor se vea forzado a consumir nuevamente otro producto. Dentro de esta se encuentran los siguientes tipos obsolescencias programadas:
  - *Función*: Esta se presenta cuando un producto sustituye a otro por una funcionalidad mejor.

- *Calidad*: Esta se presenta cuando los componentes del producto se vuelven inservibles por un mal funcionamiento programado.
  - *Deseo*: Esta ocurre cuando el producto, siendo aun completamente funcional y sin haber un sustituto mejor, deja de ser deseado por los cambios de moda o estilo, y se le asocian valores peyorativos que disminuyen su deseo de compra y motivan a su cambio.
  - *Incorporada*: Esta podría ser fácilmente considerada como un delito, debido a que provoca un daño económico a los consumidores que adquieren el producto cuyas expectativas de duración y disponibilidad son diferentes a las reales.
  - *Psicológica*: Se promueven nuevos productos en función a las tendencias de moda y el lujo, disminuyendo el atractivo de los modelos anteriores.
  - *Tecnológica*: Actualización continua y rápida de productos (ya sea hardware o software) en los ordenadores, dispositivos de entretenimiento o telefonía móvil.
- *Obsolescencia percibida*: Se relaciona con la industria del software, que requiere constantes actualizaciones. Esto se da en los dispositivos de juego, que ante dichas actualizaciones las memorias de sus equipos no permiten usarlos.

Es relevante hacer conciencia que estos tipos de obsolescencia están haciendo que los RAEE se generen con mayor frecuencia en los domicilios, siendo guardados en los cajones de las casas, o simplemente tirados a la basura. (Estévez, R., 2014).



Figura 2.3. Evolución tecnológica, (Pascual J.,2016)

Finalmente, es importante mencionar que los diferentes AEE con el paso del tiempo son más desechables, debido a diferentes aspectos, como la obsolescencia, un celular es en promedio reemplazado cada año, una laptop/PC cada 5 años, y las televisiones cada 8 años en promedio, como se puede apreciar en la figura 2.4. (Baldé et al., 2017).

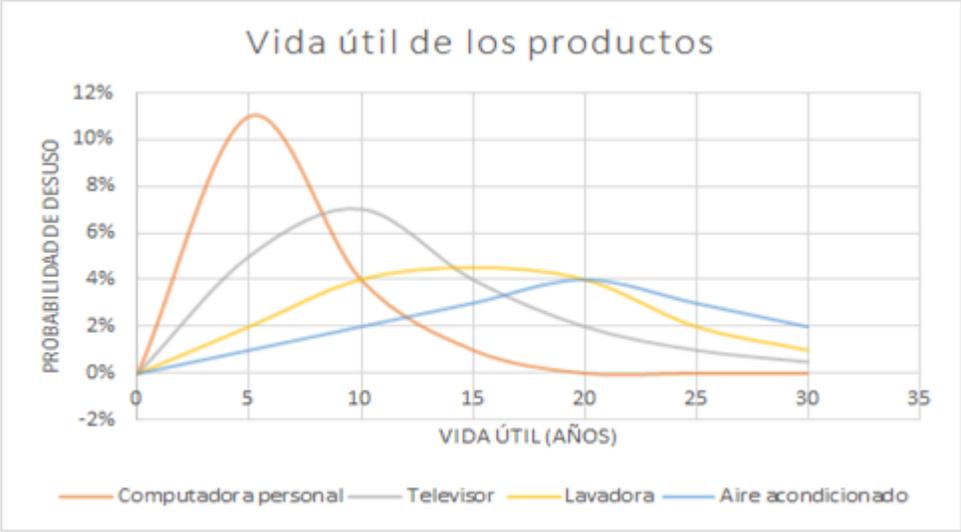


Figura 2.4. Vida útil de los productos, (Baldé et al., 2017)

## **2.2. Clasificación: Materiales y componentes valorados de los RAEE**

Los AEE comprenden una gran variedad de productos, pero a efectos estadísticos se prefiere seguir una clasificación en base a las funciones que se asemejen a estos aparatos, compuestos materiales comparables, pesos medios y atributos similares al final de su vida útil.

Por lo que, en la segunda edición de las estadísticas de residuos electrónicos: Directrices para la clasificación, presentación de informes e indicadores (Baldé et al., 2017) clasifica a los AEE en 54 categorías centradas en los productos, la categorización se denomina UNU-KEYS.

Las 54 categorías de productos AEE se agrupan en seis categorías generales, que además la Unión Europea (UE) utiliza para clasificarlos (2012/19/UE, 2012):

- *Categoría 1. Aparatos de intercambio de temperatura:* Comúnmente denominados equipos de refrigeración y congelación. Se incluyen en esta categoría los refrigeradores, equipos de deshumidificación, radiadores de aceite, los congeladores, los aparatos de aire acondicionado, las bombas de calor, y otros aparatos de intercambio de temperatura que utilicen otros fluidos que no sean el agua.
- *Categoría 2. Pantallas y monitores:* Se incluyen en esta categoría los ordenadores portátiles, los televisores, los monitores, incluidos las tabletas y los miniportátiles.
- *Categoría 3. Lámparas:* Se incluyen en esta categoría las lámparas LED, las lámparas de descarga de alta intensidad y las lámparas fluorescentes.
- *Categoría 4. Grandes aparatos (>50cm):* Se incluyen en esta categoría las secadoras, las lavadoras, los lavavajillas, las cocinas eléctricas, las impresoras grandes, las fotocopiadoras, los paneles fotovoltaicos. También placas de calor eléctricas, aparatos de reproducción de sonido o imagen, equipos de música (excepto los órganos de tubo instalados en iglesias), máquinas de hacer punto y tejer, grandes ordenadores, grandes impresoras, cartuchos de impresión, tóner y otros consumibles relacionados grandes con partes eléctricas, copiadoras, grandes máquinas tragaperras, productos sanitarios de grandes dimensiones, grandes instrumentos de vigilancia y control, grandes aparatos que suministran productos y dinero automáticamente.
- *Categoría 5. Pequeños aparatos (<50cm):* Se incluyen en esta categoría los equipos de ventilación, las tostadoras, las aspiradoras, los hornos de microondas, los hervidores eléctricos, las afeitadoras eléctricas, las básculas, las calculadoras, los aparatos de radio, las videocámaras, los juguetes eléctricos y electrónicos, las

pequeñas herramientas eléctricas y electrónicas, los pequeños dispositivos médicos y los pequeños instrumentos de supervisión y control.

- *Categoría 6. Aparatos de informática y de telecomunicaciones pequeños:* Se incluyen en esta categoría los teléfonos móviles, los dispositivos del sistema mundial de determinación de la posición (GPS), los teléfonos, los encaminadores, las computadoras personales, las impresoras y calculadoras de bolsillo.

Cada RAEE tiene una tasa de crecimiento estimada en gran parte debido a la frecuencia de uso y a la propia innovación de la industria (por ejemplo, la miniaturización), en conjunto, se estima que la cantidad de estos residuos generados por categoría crezca en los próximos años.

Se tiene contemplado que los residuos en la categoría de intercambio de temperatura y de los pequeños y grandes aparatos marcarán las tasas de crecimiento más elevadas como se observa en la figura 2.5 y se calcula que los desechos de las pantallas disminuyan en los siguientes años debido a la sustitución de las pesadas pantallas de CRT por las planas. (Baldé et al., 2017)

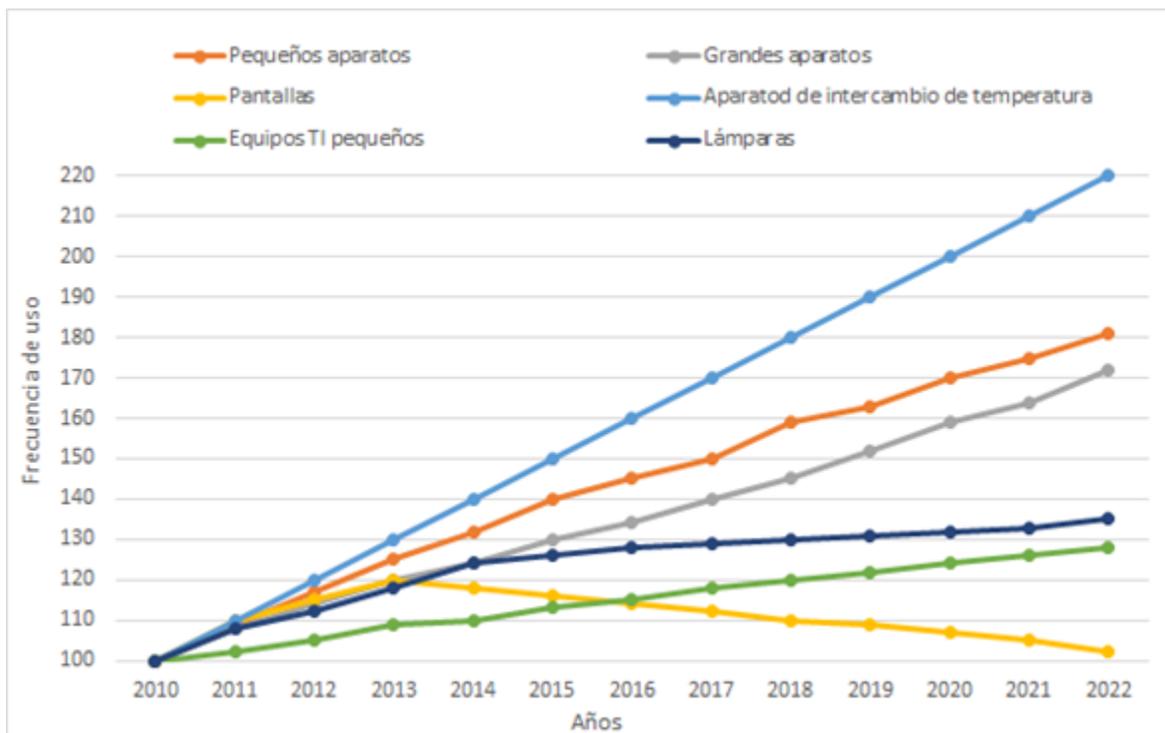


Figura 2.5. Tasa de crecimiento estimada de los residuos electrónicos por categorías, (Baldé et al., 2017)

### 2.2.1. Computadoras

Para poder obtener las partes principales de una computadora que interesan recolectar, en este apartado se muestran las piezas y componentes que contiene, de qué materiales suelen construirse estas piezas, y una breve descripción de su función, como se observa en la figura 2.6 y la tabla 2.4. de esta manera se sabe cuáles son más valiosas y se logrará hacer estimados de cuánto material se puede obtener de cada computadora en el capítulo IV.



Figura 2.6. Tarjeta Madre (Elaboración propia, 2020)

Tabla 2.4. Componentes de computadora.

Componente	Función
<b>Monitor</b>	Muestra la información en imágenes y textos, que son generados por la tarjeta de video.
<b>Gabinete</b>	Aloja todos los componentes.
<b>Tarjeta madre</b>	Es la infraestructura en forma de una placa que mantiene funcionando a los componentes.
<b>Socket CPU</b>	Es donde se instala el procesador (CPU).

<b>CPU</b>	El procesador es un cuadrado de alrededor de 2 pulgadas con un chip del tamaño de una uña. Es el encargado de procesar y administrar las funciones lógicas, aritméticas, entre otras.
<b>Tarjeta RAM</b>	Almacena la información de las aplicaciones activas de la computadora. Esta memoria de corto plazo funciona cuando la computadora está en funcionamiento.
<b>Southbridge</b>	Es un chipset que sirve para conectar los puertos de la parte sur de la tarjeta madre con el CPU. Por lo que actúa como intermediario entre el CPU y sus demás componentes.
<b>Puertos PCI-e 16x y 4x</b>	Para conectar cualquier tipo de tarjeta extra agregando potencia y funcionalidad a una computadora, como las tarjetas de video.
<b>Tarjeta de vídeo</b>	Procesa toda la información gráfica mostrada en el monitor.
<b>Tarjeta de sonido</b>	Es la responsable del sonido en los altavoces o audífonos.
<b>Unidad de disco duro</b>	Es el centro de almacenamiento de datos del computador, donde se instala el software y se almacenan los documentos y todo tipo de archivos.
<b>Batería</b>	Esta es una pila común, su función es alimentar al equipo y mantener la información guardada aun cuando la computadora no está en funcionamiento.

<b>Puertos I/O</b>	Es donde se conectan los componentes externos al gabinete de una computadora, los periféricos.
<b>Mos-Fets</b>	Son un conjunto de bobinas, capacitores y transistores los cuales se encargan de controlar la energía del CPU.
<b>BIOS</b>	Es donde se guarda la información básica para que la tarjeta madre funcione y detecte los componentes que se conectan.
<b>Pines de gabinete</b>	En esta sección se encuentran pequeños pines y conectores que tienen la función de conectar la tarjeta madre al gabinete.

(Elaboración propia, 2021)

De estos componentes se pueden hallar distintos materiales, en el gabinete se encuentra aluminio, plástico y vidrio; en la tarjeta madre normalmente vaquerita (material aislante) plástico, cobre, estaño; en el CPU silicio, cerámica, oro. Además, es importante mencionar que varía por fabricante.

Según el INECC las computadoras están compuestas por metales (49%), plásticos (23%) y por vidrio (25%) principalmente; y se aprecia en la siguiente figura 2.7. y tabla 2.5 los porcentajes de sus componentes. (INECC, 2013).

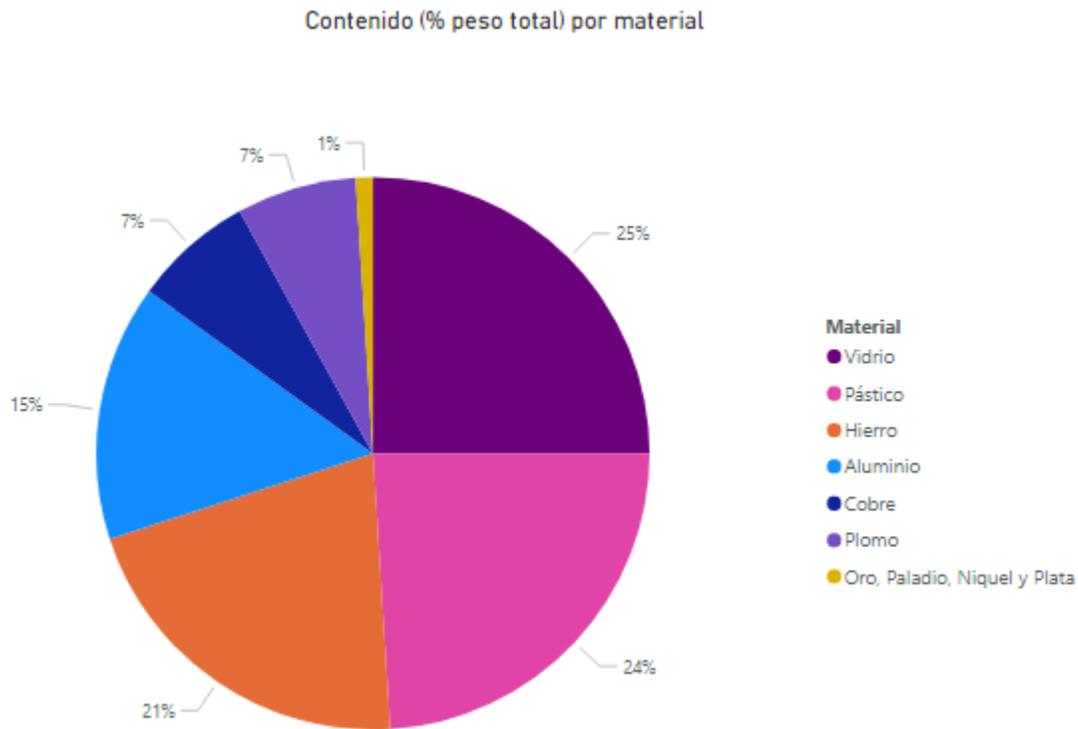


Figura 2.7. Porcentaje de material en una computadora, (Elaboración propia, 2021)

Tabla 2.5. Porcentaje de metales preciosos en una computadora

Metales preciosos (1%)	Porcentajes
<b>Oro</b>	0.1297%
<b>Paladio</b>	0.0003%
<b>Níquel</b>	0.85%
<b>Plata</b>	0.02%

(Elaboración propia, 2021) *Nota: Varía por fabricante*

En una computadora se puede extraer oro principalmente de los procesadores de la tarjeta madre, pines de conexión y los conectores de tarjetas RAM, de sonido o de video, como se puede observar en la figura 2.8 y 2.9; ya que para las conexiones se recubren de oro, lo cual varía en cada componente, debido a que el oro se utiliza para garantizar la superconductividad, logrando la transferencia rápida de información y tener mayor resistencia a la corrosión.

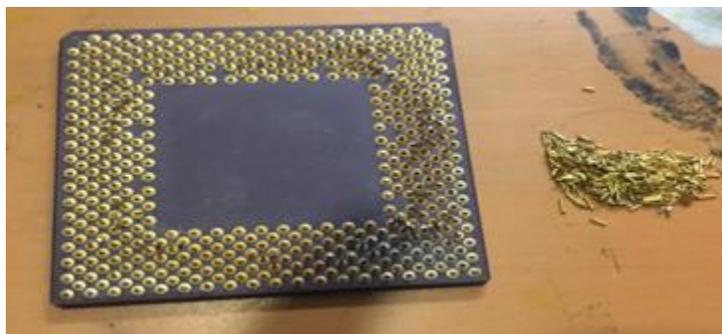


Figura 2.8. Procesador, (Elaboración propia, 2021)

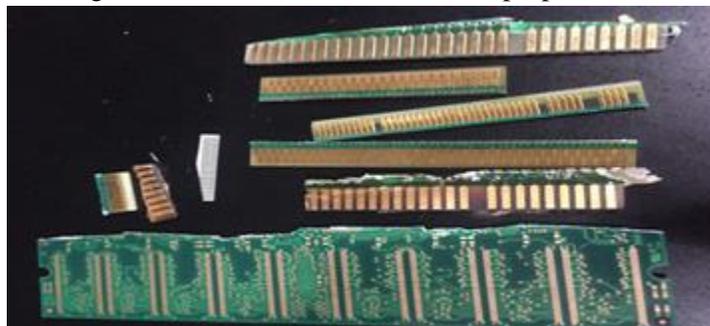


Figura 2.9. Pines de tarjetas RAM, video y sonido, (Elaboración propia, 2021)

### ***2.2.2. Celulares***

Los teléfonos móviles en desuso, figura 2.10, entran en la categoría de “Equipos de informática y telecomunicaciones” en la clasificación de los RAEE, es importante destacar que, en la actualidad, en México se cuenta con un promedio de 112 millones de teléfonos inteligentes (smartphones) que ocupan los Mexicanos, número que aumenta día con día, esta cantidad se puede comparar con los datos de la actual versión de la Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica del (INEGI), la cual indica que en México residen aproximadamente más de 125 millones de personas, de manera que se puede decir que es cercano el tener en promedio un smartphone por habitante. (INEGI, 2020).



Figura 2.10. Celulares en desuso, (Elaboración propia, 2021)

En el mercado nacional de celulares se registra un incremento en el balance de marcas y modelos que año tras año ocupan los estantes, no sólo de las tiendas de los operadores, sino también de las tiendas de autoservicio, departamentales y conveniencia.

Existe una competencia entre varias empresas, figura 2.11, lo que genera diversidad de opciones de compra, en la siguiente gráfica se encuentra la participación en el mercado por fabricante de equipo en México 2020:

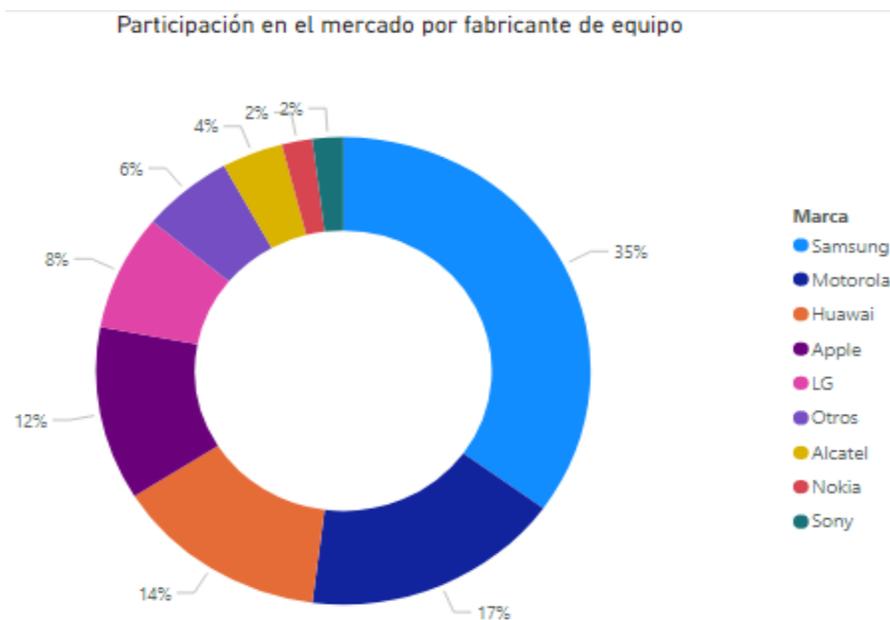


Figura 2.11. Participación de mercado por fabricante de equipo, (Forbes, 2020)

Es notorio mencionar que el consumo de celulares en el mundo ha aumentado enormemente en la última década, como se aprecia en la figura 2.12 por lo que esto refleja los análisis realizados anteriormente respecto a la generación de RAEE, ya que al incrementar considerablemente al año la compra de celulares nuevos significa que se desechan gran cantidad de estos. También se aprecia que en el 2020 disminuyó el consumo, lo cual puede atribuirse a la pandemia de COVID-19. (Statista, 2021).

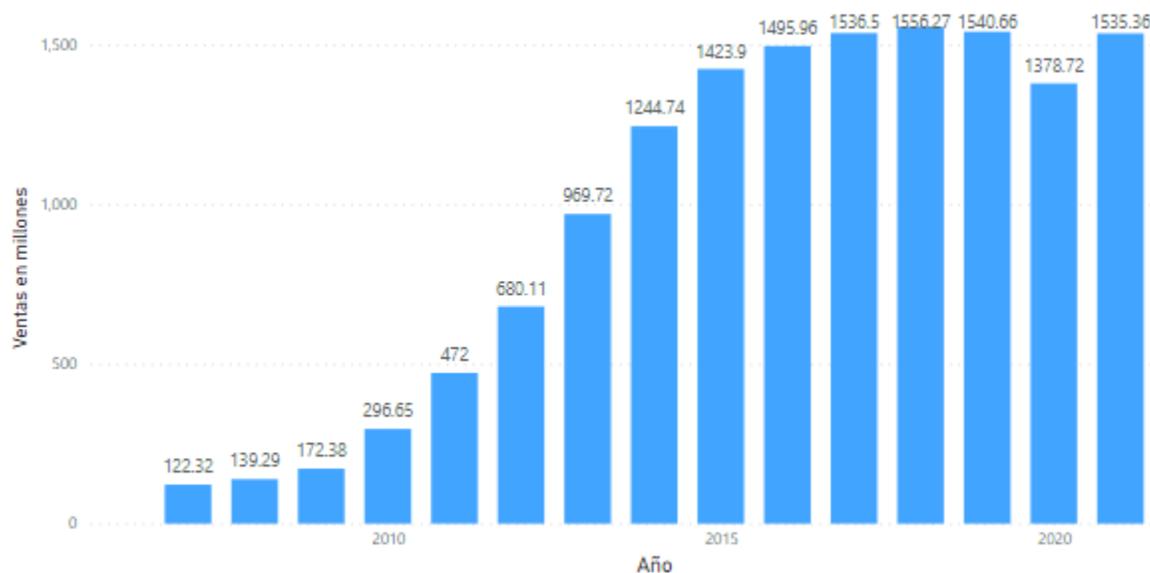


Figura 2.12. Cantidad de teléfonos inteligentes vendidos a usuarios finales en todo el mundo desde 2007 hasta 2021, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Statista, 2021).

El material del que están compuestos los teléfonos inteligentes varía, dependiendo de la empresa que los fabrica, pero se puede encontrar materiales en diferentes porcentajes como plástico, vidrio, cerámica, carbono, litio, hierro, níquel, estaño, cobalto, zinc, cobre, plata, oro, cadmio, plomo, entre otros. En la siguiente figura 2.13 se muestra un aproximado de los materiales:

### Componentes de un teléfono inteligente

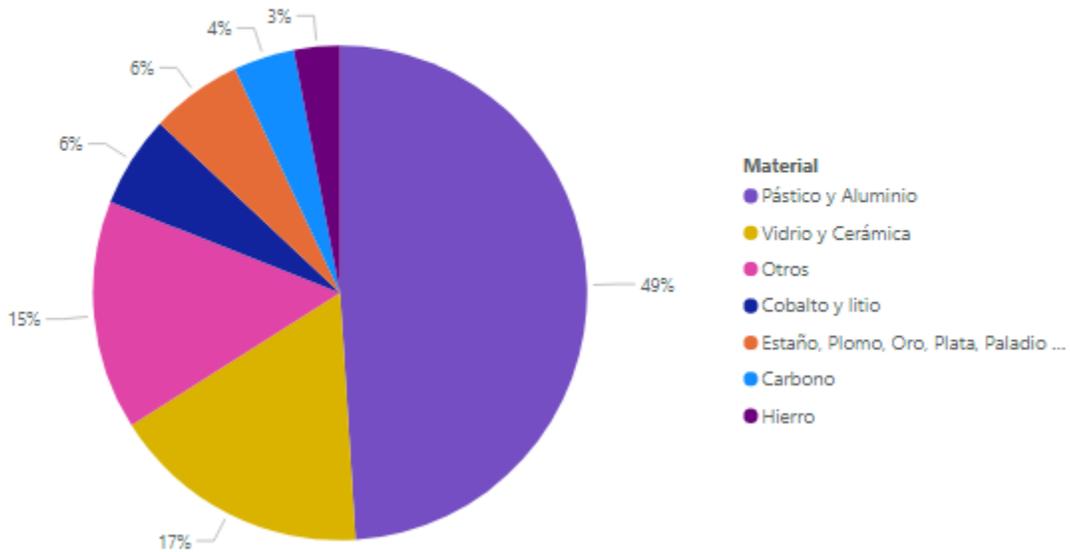


Figura 2.13. Componentes de un teléfono inteligente, (PASE, 2019)

### 2.2.3. Televisiones

Las televisiones entran en la categoría 2 de clasificación de los RAEE, que es la de monitores y pantallas. Se pueden encontrar varios tipos de televisores, debido a que al paso de los años han ido evolucionando, desde grandes tamaños hasta diseños más compactos (pantalla plana).

Los televisores de rayos catódicos (CRT) están saliendo del mercado y de los hogares mexicanos debido principalmente al gran auge que han tenido otros televisores más modernos como los de LCD, plasma y LED, así como también al apagón analógico, el cual busca implementar en todo el país la señal digital, señal que podrá ser captada por televisores modernos como los antes descritos y los televisores CRT no podrán recibir esta señal a menos que se le adapte un decodificador de señal. Por estas razones es que muchos televisores CRT son desechados de manera inconsciente a la basura lo cual conlleva un gran riesgo para el ambiente y la salud pública (Guadarrama, P., 2016).

Tipos de televisores:

- *Televisor CRT*: El tubo de rayos catódicos, figura 2.14, abreviado normalmente como CRT (Cathode Ray tube), la tecnología de televisión más antigua inventado en 1897 por Ferdinand Braun, primer televisor en 1926 por John Logie Baird.



Figura 2.14. Televisor CRT, (Elaboración propia, 2021)

- *Televisor LCD*: La tecnología LCD, Figura 2.15. Usa moléculas de cristal líquido implementadas entre diferentes paneles polarizados, que se rotan según se quiere mostrar un color u otro. Esto en cada color y píxel. Si pasa por los dos paneles, saldrá luz blanca, y si no, luz negra. De manera que según sea la variación se genera un color u otro y de estos cristales, unos son reflectivos (reflejan la luz externa) y otros backlight (transmiten la luz blanca).



Figura 2.15. Televisión LCD, (Ohmygeek, 2015)

- *Televisores de Plasma*: Su inventor fue Donald Bitzer, se caracterizan por ser planas livianas, con una capa superficial, figura 2.16, que abarca millones de pequeñas celdas. Cada celda contiene neón y xenón a baja presión, recubiertos por una sustancia fosfórica. En cada celda, hay tres sub-celdas que aportan los respectivos colores primarios, rojo, verde y azul.



Figura 2.16. Televisión plasma, (Ohmygeek, 2015)

- *Televisiones OLED*: Son de las más nuevas del mercado, incorporando en su tecnología material orgánico auto luminiscente para cada píxel, figura 2.17, de manera que cada uno se enciende y apaga de forma independiente. Controlando el color y la iluminación punto a punto.



Figura 2.17. Televisión OLED, (Coopel, 2021)

➤ Proceso de reciclaje de un televisor analógico:

La empresa española Eco Recycling S.A., con una gran experiencia en la logística y tratamiento de RAEE, utiliza el siguiente proceso para reciclar televisores analógicos (Guadarrama, P., 2016):

1. Ya teniendo los RAEE, los monitores y televisores se ponen en la base de una resbaladilla en una cinta transportadora que los conduce a las mesas de selección donde se divide la carcasa del monitor.
2. La carcasa de plástico se escoge según su estructura y calidad (de poliestireno o plástico negro, de alto impacto, conocido como PS, plástico ABS, el de los monitores) y subsecuentemente, ser tritura.

3. Se tiene una criba que da inicio a la primera separación granulométrica, de manera que la más fina es conducida por un separador magnético que brinda la fracción férrica de la no férrica. La que es más granulosa pasa por otro plan donde existe otro separador magnético que realiza una función similar a la primera. El objetivo es que cada fracción debe de dejarse limpia, libre de impropios.
4. Después, es necesario apartar manualmente todas las fracciones resultantes del proceso: como transformadores, cables, tarjetas de circuito impreso, aluminio, cobre, madera, acero inoxidable, latón, condensadores, pilas, entre otros. Todas estas fracciones se harán llegar a gestores externos que estén autorizados por la Agencia de Residuos de Cataluña.
5. Finalmente, se debe centrar en el tubo de rayos catódicos, el cual tiene plomo y polvo de fósforo (dos de los elementos más dañinos para el medio ambiente). El primero, en su mayoría concentrado en el vidrio del cono y el segundo, impregnando el vidrio de la pantalla. Usando un disco diamantado se resigue el contorno del tubo y mediante unas cintas incandescentes se quema hasta que por estrés térmico se provoca una rotura. A partir de ahí se divide el vidrio del cono, menos grueso que el de la pantalla. Este último, ya que, a su menor contenido en plomo, se puede utilizar para cualquier otra aplicación.



Figura 2.18. Televisiones analógicas en la basura, (UERDA, 2020)

## **2.3. Impactos**

### **2.3.1. Impactos a la salud**

Entre los componentes de los elementos RAEE, se encuentran sustancias y materiales tóxicos, como los metales pesados, los Bifenilos Policlorados, los Éteres Bifenílicos Polibromados y materia que, al incinerarse, en las condiciones no propicias, fomentan sustancias tóxicas como las dioxinas y los furanos, que ambientalmente son problemáticas y que impactan indirecta y directamente a la salud de las personas. A continuación, los agentes más dañinos a la salud:

#### **➤ Plomo:**

Este elemento también es conocido como óxido de plomo, el cual en los RAEE se puede encontrar en placas de baterías, soldaduras, tubos de rayos catódico de las computadoras y televisores. Además, se estima que una computadora personal contiene aproximadamente 0.4 kg de plomo y un televisor contiene cerca de 2 kg de plomo.

El plomo se puede absorber por inhalación de aerosol o por ingestión, de manera que una exposición de corta duración puede tener como consecuencia efectos en el tracto gastrointestinal, sistema nervioso central, riñones y sangre, lo cual da lugar a daño renal, shock, cólicos, anemia y encefalopatías. Sin embargo, la exposición prolongada puede llevar a la muerte.

En el ambiente esta sustancia es potencialmente peligrosa, en especial al aire y al agua, por lo cual es necesario evitar tratarla sin cuidado. En la cadena alimentaria, afecta a los seres humanos con la bioacumulación, concretamente en vegetales y organismos acuáticos, especialmente en los peces (Castellanos, N., 2005).

#### **➤ Mercurio:**

Se calcula que el 90% del mercurio de los RAEE tienen origen en las pilas y sensores, y en pocas cantidades en los relés y tubos fluorescentes.

Se absorben por inhalación, a través de la piel y como vapor, sus efectos son principalmente en los riñones y en el sistema nervioso central, ocasionando inestabilidad emocional y temblores, alteraciones cognitivas y del habla.

En el medio ambiente, afecta a los organismos acuáticos y a los consumidores por la bioacumulación de esta sustancia (Castellanos, N., 2005).

➤ Cadmio:

De este elemento se estima que el 90% que se puede encontrar en los RAEE procede de las pilas recargables o de componentes de los circuitos impresos. Mayormente se utiliza como estabilizador en el PVC.

Se absorbe por inhalación del aerosol y por ingestión, en pequeñas dosis irrita los ojos y el tracto respiratorio, la inhalación puede provocar un edema pulmonar y fiebre de los humos metálicos. Por otro lado, afecta al riñón, con una proteinuria y hacer que falle el riñón ya que es cancerígeno. (Castellanos, N., 2005).

➤ Bario:

Principalmente en los paneles de tubos de rayos catódicos se absorbe por ingesta, irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio. (Castellanos, N., 2005).

➤ Cromo:

Se encuentra presente en los elementos ferrosos y en su variante de cromo VI se encuentra en el cromado en las tinturas y pigmentos.

Se absorbe por inhalación del aerosol y por ingestión, el contacto prolongado o repetido puede ocasionar sensibilidad de la piel, el cromo hexavalente es carcinógeno. (Castellanos, N., 2005).

➤ Arsénico:

Presente en los tubos de rayos catódicos antiguos. Se absorbe por inhalación del aerosol, a través de la piel y por ingestión. Produciendo que se irriten los ojos, la piel y el tracto respiratorio puede causar daños en el sistema circulatorio, sistema nervioso, riñón y tracto gastrointestinal, produciendo convulsiones, alteraciones renales, graves hemorragias, pérdida de fluidos y electrolitos, shock y muerte. La exposición prolongada ocasiona la muerte, ya que es cancerígena.

Es tóxico para la flora y fauna acuática, es indispensable impedir que el producto químico se deseché al ambiente (Castellanos, N., 2005).

➤ Selenio:

Normalmente está presente en los tableros de circuitos sirviendo como rectificador de suministro de energía.

Se puede absorber inhalando, por la piel y por ingestión, En una exposición de corta duración la sustancia irrita los ojos y el tracto respiratorio. La inhalación del polvo puede provocar un edema pulmonar, síntomas de asfixia, escalofríos, fiebre y bronquitis. El contacto constante puede producir dermatitis en la piel. Afecta al tracto respiratorio, el tracto gastrointestinal y a la piel, provocando náuseas, vómitos, tos, coloración amarilla de la piel, pérdida de uñas, aliento alíaceo y afecciones dentales (Castellanos, N., 2005).

➤ PCB, PCT y PBB:

Los condensadores, disyuntores, cables eléctricos, motores, electroimanes, interruptores, transformadores, reguladores de voltaje, selladores, pinturas, fluidos dieléctricos y plásticos que contengan o estén contaminados con PCB, PCT y PBB pueden tener los siguientes efectos: (Castellanos, N., 2005).

- Los Bifenilos Policlorados (PCB):

Prohibidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) eran se usaban en la construcción de: transformadores eléctricos, condensadores eléctricos, reactancias de lámparas, interruptores eléctricos, relés y otros accesorios, cables eléctricos, motores eléctricos y electroimanes, así como plastificante en cloruro de polivinilo, neopreno y otras resinas artificiales. Contienen 12 congéneres que la OMS asignó factores de equivalencia de toxicidad por su comportamiento similar a la dioxina.

- Los Terfenilos Policlorados (PCT):

Tienen propiedades físicas y químicas similares a las de los PCB por lo que tiene aplicaciones equivalentes, son insolubles en el agua, resistentes a la degradación, y son poco menos volátiles que los PCB.

- Los Bifenilos Policromados (PBB):

Son sólidas o cerosas a temperatura ambiente. Insolubles en agua, resistentes a la degradación, y principalmente se usan como retardadores de llama por lo que se les agraga al plástico de acrilonitrilo butadieno estireno, a las pinturas, lacas y a la espuma de poliuretano.

➤ Retardantes de llama:

Son compuestos de sustancias químicas que se usan en los componentes plásticos (carcasas), con el objetivo de evitar que se incendien con facilidad. Los más comunes son los siguientes (Castellanos, N., 2005):

- Éteres de Polibromodifenilos (PBDEs) Son compuestos de sustancias químicas

ambientalmente persistentes, algunos bioacumulativos pudiendo interferir en el desarrollo del cerebro de los animales. Por otro lado, varios de estos PBDEs son disruptores endocrinos afectando las hormonas relacionadas con el desarrollo sexual. Además, hay estudios en donde se ha comprobado que daña al sistema inmunológico.

- Tetrabromobisfenol – A (TBBPA) Hay estudios que comprueban que afecta las hormonas tiroideas, que son responsables en el crecimiento y el desarrollo, además que presentan efectos en otros sistemas, como el sistema inmunológico, el hígado y los riñones.
- El Fosfato de Trifenilo (TPP) Tóxico para la vida marina, inhibe las enzimas vitales en la sangre humana. En ocasiones produce dermatitis por contacto en algunas personas y además de ser un disruptor endócrino.

En resumen, los estudios indican que la exposición a residuos electrónicos tiende a ocasionar principalmente los siguientes padecimientos. (Baldé et al., 2020):

- Memoria olfativa
- Daño al ADN y expresión genética
- Pérdida de audición
- Coagulación súbita de la sangre
- Cambios de la regulación cardiovascular
- Nivele patogénicos de glucosa en sangre
- Efectos en la función hepática
- Trastornos genitales y reproductivos masculinos, así como efectos en la cantidad de esperma.

### ***2.3.2. Impacto ambiental***

El medio ambiente es afectado de diversas maneras por los RAEE, como lo son el agotamiento de recursos no renovables, debido a la sobreexplotación de estos que se lleva a cabo en prácticamente todas las ocasiones de manera tradicional con la minería, siendo una industria que explota los yacimientos alterando el equilibrio ambiental con ácidos, como el ácido sulfúrico entre otros

Sumando a lo anterior en diferentes países, como Ghana, existen recicladores clandestinos que utilizan la incineración para extraer los materiales valiosos, de manera que generan gases nocivos que contaminan a la atmósfera directamente. También es importante mencionar la práctica de la lixiviación en rellenos sanitarios que contaminan el suelo y afectan directamente los hábitats naturales. (Europa Press, 2008).

➤ *Agotamiento de recursos no renovables.*

El uso tanto de fuentes renovables como no renovables más allá de su tasa de regeneración es considerado un agotamiento de los recursos naturales, tabla 2.6. La demanda exponencialmente creciente de AEE y la cantidad de recursos finitos de la tierra es similar a un pozo que se explota sin respetar sus periodos de recarga. (Valero, A., 2010).

Desde que se comenzó a explotar los recursos minerales de manera considerable a comienzos de la revolución industrial (1790) solo se ha mejorado en técnicas para perforar más profundo la tierra; romperla en más partes y trabajarla mejor, en fábricas cada vez más sofisticadas con mejores cadenas productivas. Logrando a su paso mayor capacidad, para fabricar cada vez más productos que se han desarrollado paralelamente gracias a los descubrimientos científicos de cada época. (Valero, A., 2010).

Todo este frenesí continua en la actualidad impulsado por los incentivos económicos de las industrias y el consumo desproporcionado del consumidor y solo queda preguntarse: ¿por cuánto tiempo se podrá seguir produciendo? Como se puede observar en la tabla 2.6, se estima, por ejemplo, que el cobre se agote en 2024 de los yacimientos naturales o sea más complicada su extracción, dejando de ser viable la obtención en términos económicos. (Valero, A., 2010).

Tabla 2.6. Fechas estimadas para el agotamiento de producción.

<b>Fechas estimadas para el agotamiento de producción</b>	
<b>Gasolina</b>	2023
<b>Cobre</b>	2024
<b>Aluminio</b>	2057
<b>Carbón</b>	2060
<b>Hierro</b>	2068

(Valero, A., 2010)

Tales proyecciones pueden cambiar, a medida que se hacen nuevos descubrimientos y se obtengan los datos disponibles sobre Recursos Minerales y Reservas Minerales.

➤ *Emisiones contaminantes a la atmósfera*

Se entiende como contaminación atmosférica a la presencia de sustancias que directamente por sí solas, o por las reacciones químicas que se dan entre ellas, provocan riesgos y/o daños para las personas y para el medio ambiente. Esto se ha convertido en un problema tanto a nivel local como a nivel regional y global: las emisiones no han parado de aumentar pese a los diferentes tratados firmados. (Oxfam, 2018).

Las actividades principales contaminantes son (Oxfam, 2018):

1. Instalaciones de combustión, donde se queman combustibles fósiles para conseguir calor y electricidad.
2. Compuestos orgánicos generados en las industrias de pintura, barnices, siderurgia, madera, cosmética y farmacéutica.
3. Otras industrias, como minería y cementeras.
4. Centros de incineración de residuos y materias.
5. Refinerías.
6. Transporte, tanto de vehículos industriales como particulares.

Los RAEE están presentes de manera directa o indirectamente en estas actividades, pero principalmente en los centros de incineración clandestinos. Debido a que la incineración es un método obsoleto y poco sostenible para lidiar con estos residuos. Por lo que es necesario que se desarrollen y adopten nuevas filosofías y prácticas para el manejo sustentable de estos residuos alrededor del mundo. (Europa Press, 2008).

➤ *Contaminación por la minería*

La minería a cielo abierto (MCA) es una industria que genera grandes problemas ambientales, sociales y culturales. Siendo un negocio que genera beneficios lucrativos, sin embargo, esto es para un grupo reducido de personas a costa de muchas, donde lamentablemente, se termina silenciando con incentivos a muchos para no advertir de las consecuencias de estas actividades dañinas, sin que nadie la frene. (Asociación Geoinnova, 2016).

El elevado impacto ambiental de la MCA es provocado por la esencia misma de esta actividad, la cual se fundamenta en la remoción, a cielo abierto de grandes cantidades de suelo y subsuelo, que subsecuentemente se trabajan para recuperar el mineral. Normalmente, la tierra removida es bastante superior a lo que se termina extrayendo.

Lo peor de realizar esta minería es el cómo se lleva a cabo y el manejo de sustancias sumamente nocivas, como el cianuro o el mercurio en su operación:

Las etapas de la MCA son:

- Sondeo y exploración de yacimientos.
- Desarrollo y preparación de las minas.
- Explotación de las minas.
- Tratamiento de los minerales obtenidos con el propósito de obtener productos comerciables.

Así mismo en esta minería es la implementación de elevadas cantidades de cianuro con el fin de extraer el oro del resto del material removido. Para esto, el yacimiento debe ser muy grande y es necesario cavar cráteres muy grandes, que normalmente tienen más de 150 hectáreas de extensión y superan los 500 metros de profundidad. Con el fin de obtener minerales e incrementar el negocio de algunos, se lleva consigo extensiones considerables de tierra, además del altísimo desperdicio de agua (Asociación Geoinnova, 2016).

➤ *La lixiviación en rellenos sanitarios*

Cuando no se puede tratar o no existe infraestructura para tratar los residuos, estos acaban siendo dispuestos en rellenos sanitarios, los cuales son basureros gigantes en un hoyo, en donde a largo plazo se acumulan y generan lixiviados, que son sustancias que secretan estos residuos y pueden llegar a filtrarse en la tierra y contaminar en el peor de los casos mantos acuíferos. (Gomez, H., Vega, C., Davila, R., Velazco, F. Chapa, J., 2015).

Diversos estudios epidemiológicos han demostrado un aumento en el riesgo de presentar problemas de salud en las personas que viven a los alrededores de los rellenos sanitarios. Esto se debe a que en estos rellenos se encuentran altos niveles de elementos como hierro, manganeso, cobre, zinc, etc., que son indispensables para la vida, pero estas concentraciones no son adecuadas, llegando a ser tóxicos a ciertas cantidades, figura 2.19.



Figura 2.19. Relleno sanitario improvisado, (Ecoinnovación, 2020)

### ***2.3.3. Impacto económico***

➤ *Escalabilidad por el aumento constante de los RAEE*

El crecimiento poblacional, y el aumento del consumo de AEE son factores que se interrelacionan mutuamente. Es seguro afirmar que si el flujo natural que lleva la sociedad no es interrumpido la industria tecnológica seguirá produciendo AEE, la población existente seguirá consumiendo y se le irá sumando la población nueva. Por lo que la industria de la minería electrónica no solo es constante, sino que es una fuerza en crecimiento, que va a requerir naturalmente ser escalada periódicamente para poder ser tratada, en su mayoría.

Si se analiza el crecimiento poblacional de México, figura 2.20, desde 1950 al 2020 y se interpola hasta el 2050 se obtiene una tasa de crecimiento de 1.1% y en el 2100 podría llegar a 350,000,000 de habitantes, figura 2.20. (Banco Mundial, 2020).

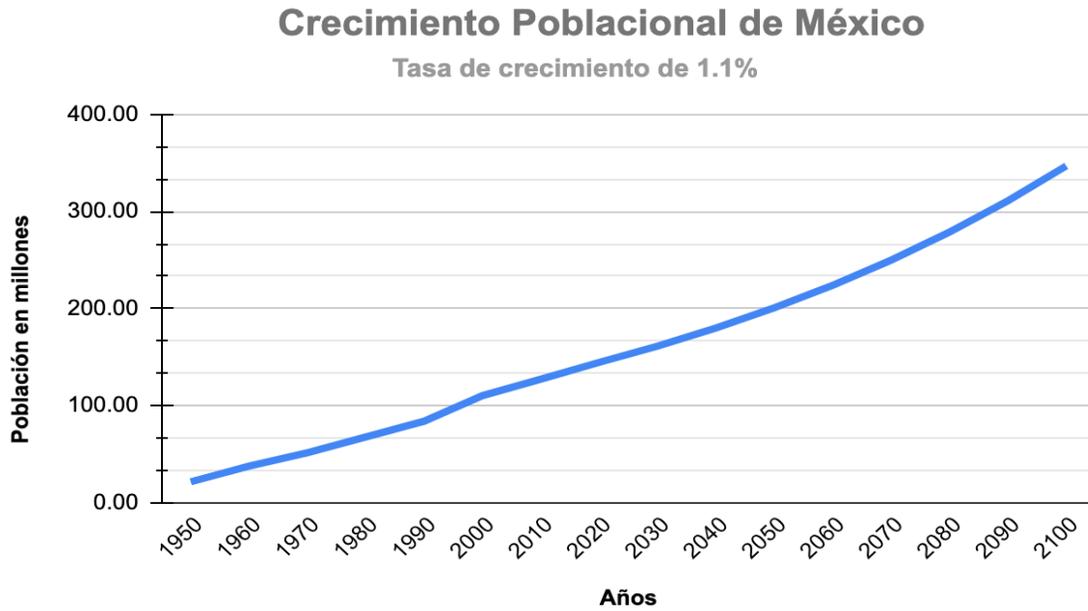


Figura 2.20. Crecimiento poblacional de México, (Elaboración propia, 2021)

Se puede observar en la figura 2.21 del análisis realizado en el capítulo III que en México el crecimiento de los RAEE al año tendrá un aumento constante aproximado del 3%.

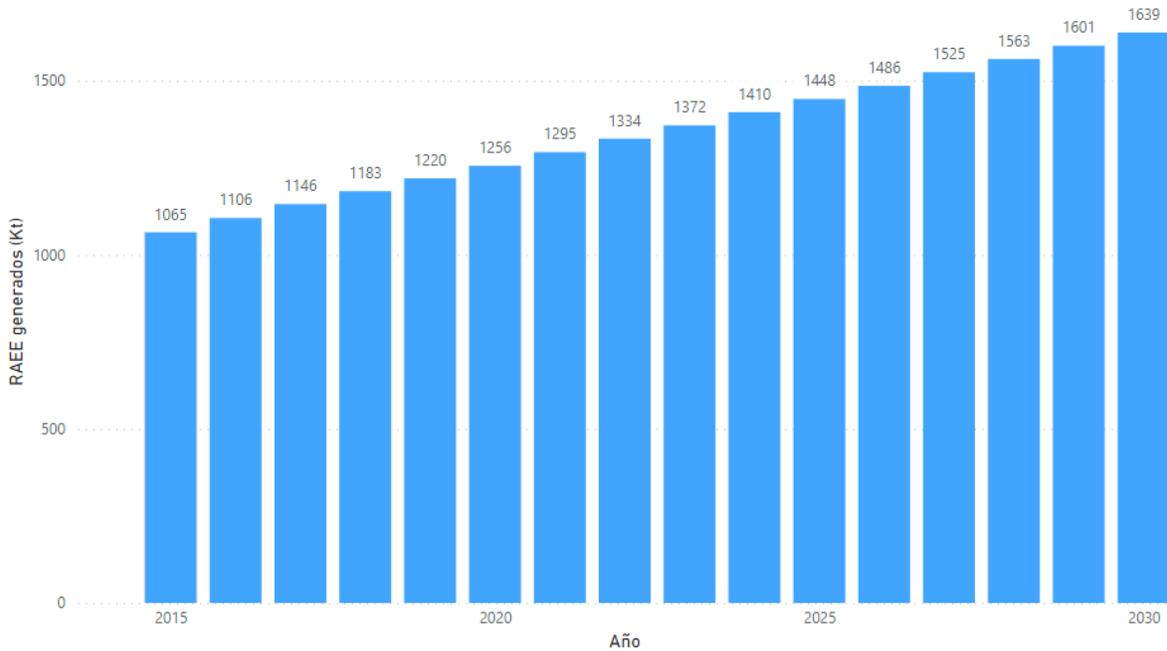


Figura 2.21. Crecimiento de los RAEE en México, (Elaboración propia, 2021)

Analizando los resultados se puede observar que el crecimiento es acelerado y que el número de RAEE aumente en 10 años, de 2020 a 2030 en aproximadamente un 30%. Así que es claro que lograr implementar minería electrónica en el país es un negocio que no solo será constante, sino que tenderá a crecer a pasos grandes año tras año.

➤ *Importancia comercial e industrial de los residuos recuperados*

El alcance del aprovechamiento que puede haber al reutilizar es inmenso, ya que, si se descomponen los residuos hasta su expresión más elemental, se puede ver que los elementos que la industria utiliza para desarrollar sus productos de manera directa e indirectamente cubre casi en su totalidad la extensión de la tabla periódica. Como se observa en la figura 2.22, los diferentes metales en un teléfono móvil.



Figura 2.22. Ejemplo de diferentes tipos de metales en un teléfono móvil, (nicepng, 2018)

Evidentemente no utiliza de manera proporcional todos los elementos, ya que el espectro de los AEE es muy amplio, y no todos los AEE son creados de la misma manera; además que los diseños, de cada fabricante varía la cantidad de material que utiliza.

El fabricante, indudablemente, buscará implementar diseños económicamente eficientes, en el sentido de que utilizaran los materiales que al ser producidos maximicen las ganancias, por lo que, al analizar la composición de estos, se encuentran periodicidades puesto que las compañías compiten entre sí. Los AEE cumplen que son en su mayoría metales férricos y que cuentan con una gran presencia de plástico, que los cubre. (Miteco, 2018)

Dicho lo anterior, los metales y los plásticos se pueden reutilizar un gran número de veces los metales de manera indeterminada y los plásticos con más limitaciones, ya que los metales no pierden sus propiedades al ser reciclados por lo que esta práctica resulta no sólo adecuada, sino que necesaria puesto que estos recursos no son renovables.

#### ➤ *Ahorro de espacios*

Otra de las virtudes de una correcta disposición de los AEE es la disminución del impacto que tiene el aumento de la cantidad de basura que es desechada. Es inevitable que por el crecimiento poblacional y la industrialización produzca más basura; pero es posible que los tiraderos no crezcan proporcionalmente.

Es importante mencionar que para que se pudiera lograr ahorros significativos sería necesario una revolución completa de la basura, ya que los RAEE actualmente representan el 4% de la basura que se podría encontrar en un basurero (Banco Mundial, 2020).

Por otro lado, si se disminuye la minería tradicional en su mayoría se podría ahorrar miles de hectáreas; dependiendo más de los recursos reciclados que están en la minería electrónica para cumplir con las necesidades de materia prima para la producción de nuevos aparatos. Este proceso será paulatino conforme existan más plantas de reciclaje y acuerdos comerciales entre los fabricantes y las plantas con o sin las normas que se implementen, para que los productores tomen más responsabilidad de sus productos.

#### ➤ *Cambio a una economía más sustentable*

El fin último del buen manejo de los AEE es ayudar a mudarse de la economía lineal en la que se vive, en donde se produce y consume de una manera desmedida, puesto que al final de la vida de un bien acaba siendo dispuesto en la basura sin tener la oportunidad de volver a usar las propiedades de los materiales de este o el propósito que este tuvo.

La economía circular es la intersección de los aspectos ambientales, económicos y sociales, que se interrelaciona con la sostenibilidad cuyo objetivo principal es mantener en la economía durante el mayor tiempo posible el valor de los productos, los materiales y los recursos no renovables como los metales valiosos, reduciendo al mínimo la generación de residuos, se centra en los siguientes principios (Economía circular, 2017):

1) La economía de la “funcionalidad”

Privilegiar el uso frente a la posesión, de manera que se incentive a las empresas a desarrollar productos funcionales a largo plazo, evitando que se desechen por obsolescencia programada. Además, es necesario lograr que diversos AEE puedan ser reciclados fácilmente o que sea factible aplicar ingeniería inversa tanto para desarmar como para reparar componentes y no todo el producto.

2) El segundo uso

Reintroducir en el circuito económico aquellos productos que fueron desechados por algunos consumidores, pero aún son funcionales para otros que pueden darles una segunda vida. Como pueden ser celulares, computadoras, electrodomésticos que sólo necesiten algo de mantenimiento, rehabilitarlos y ya así se procede a venderlos, recuperando también una fracción monetaria de su valor.

3) La reutilización

De los aparatos que no es posible recuperarlos en su totalidad se puede aprovechar algunos componentes de estos que todavía pueden funcionar para la elaboración de nuevos productos. Como en el caso de las computadoras, poder recuperar las tarjetas RAM, video o de sonido, los discos duros, solamente hay que cerciorarse de eliminar la información personal de los usuarios anteriores ya que esto representa un problema moral y de privacidad.

4) La reparación

Encontrar una segunda vida a los productos estropeados, de tal manera que estos aparatos sean completamente reparados de sus fallos mecánicos y/o eléctricos, esto implica tener las herramientas especializadas y especialistas técnicos certificados para ello.

## 5) El reciclaje

Para los aparatos que no sean factible reciclar o reparar de primera mano serán llevados a un tratamiento en donde serán separados y se extraerá la materia prima de estos para ser vendidos a las empresas productoras que ocupen dichos materiales.

Si se logra trabajar la basura de manera correcta, se podría tener una economía más sostenible como es la economía circular, figura 2.23, puesto que todo lo que se produce al final de su vida útil puede ser descompuesto para que sus partes puedan ser usadas para el diseño de un nuevo bien.

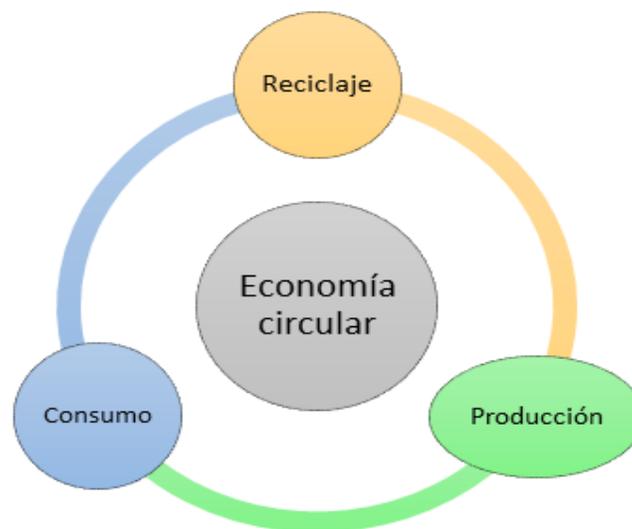


Figura 2.23. Economía Circular (Elaboración propia, 2020)

### **2.3.4. Impacto social**

#### ➤ *Empleos formales bien remunerados*

Las actividades de los RAEE son muy diversas y requerirá especialistas de diferentes áreas, dentro de las cuales la logística tiene un papel muy grande, ya que la recolección diferenciada implica un gran reto, puesto que los RAEE no se tratan en general como otro residuo sólido urbano, por lo que la recuperación de los RAEE se podría llevar a cabo dentro de los tiraderos representado un gran reto o buscar implementar centros especializados para poder captarlos de manera independiente a lo largo de diferentes áreas de trabajo. (Cuevas, H., 2013).

En una planta de tratamiento, deben de existir muchas fases del proceso que deben considerarse, equipos de recepción, de almacenamiento, posteriormente de clasificación, de desmontaje y separación.

A los materiales que no se puedan desmontar, se pasará a triturar para después volver a separar más las piezas, y ser llevadas a las técnicas específicas. Finalmente, cuando se tengan los materiales, faltará hacer refinamiento para ser vendidos a las empresas industriales regresando a las cadenas productivas. Por lo cual, se recomienda considerar las siguientes etapas, las cuales se abordarán en el capítulo IV. (Cuevas, H., 2013):

- 1.- Recolección y transporte
- 2.- Recepción y almacenamiento
- 3.- Desmontaje y separación
- 4.- Técnicas de tratamiento
- 5.- Refinamiento
- 6.- Reincorporación de la materia prima

Existen 4 grupos grandes de personas que trabajarán en conjunto.

- Grupo 1: Los recolectores.
- Grupo 2: Clasificadores y separadores.
- Grupo 3: Maquinistas y científicos específicos para las técnicas y refinamientos.
- Grupo 4: Revendedores.

➤ *Más conciencia sobre el reciclaje y el consumo*

Si los consumidores y productores se les restringe en su actividad, estos tendrán un cambio de hábitos que se verá reflejado en cambios de estrategia de mercado, así como el cambio de modelos de negocios como: mejores diseños para facilitar el reciclaje, planes de mercado más estructurados para ampliar la vida útil de los productos; dentro de los consumidores se tendrá menos consumismo y aumentó al cuidado y reparación de AEE

Posibles acciones de los productores ante una normativa fuerte los RAEE:

- Cambio de diseños para favorecer el reciclaje y la reparación de AEE.
- Cambio de plan de estrategias de mercado, promoviendo la calidad y no la cantidad.
- Apertura de negocios complementarios para la recompra de AEE usados y la reparación de estos.

Posibles acciones de los consumidores ante una normativa fuerte los los RAEE:

- Disminución del consumismo ya que los AEE tendrán costos más elevados.
- Aumento en el cuidado.
- Disminución de la disposición de AEE y quizá de otros bienes.

### 2.3.5. Impacto político

#### ➤ Normativas y sanciones de los RAEE

Es claro que las acciones políticas aparecerán más tarde que temprano, ya que es importante modificar el enfoque que se tiene actualmente que se basa en la eliminación final y no en el reúso de los materiales.

Así pues, debido a la naturaleza de los materiales será indispensable implementar normas, y sanciones a la forma de procesar los RAEE ya que, la forma en cómo se tratan los materiales y la escoria resultante merece un cuidado especial. (Prince, A., 2006).

Como se puede apreciar en la figura 2.24 la cantidad de basura electrónica se incrementa a una mayor velocidad que las normas, conciencia social o programas eficaces para el correcto tratamiento de esta, a esto se le ha llamado “Ley de la basura electrónica”.

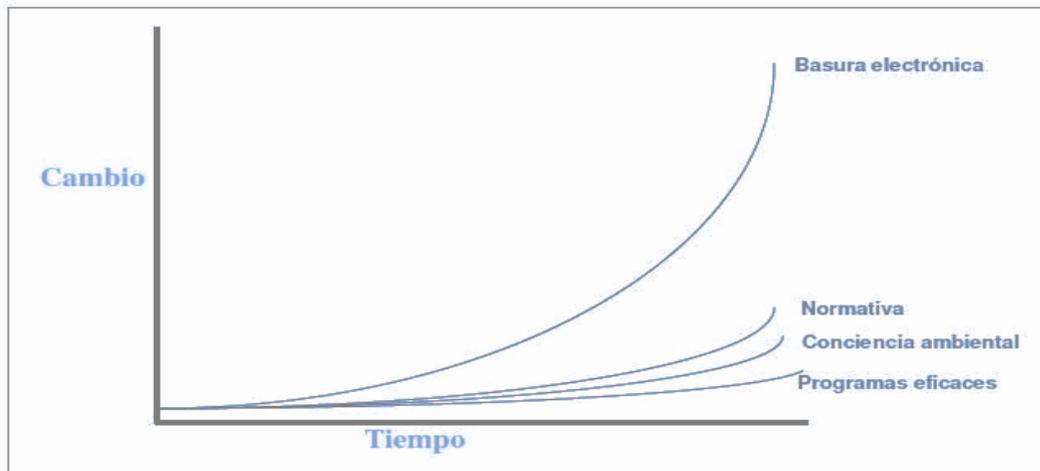


Figura 2.24. Ley de la basura electrónica, (Prince, A., 2006)

## ***2.4. Marco legal nacional e internacional de los RAEE***

Para poder situar el lugar en que se encuentra México sobre el manejo de los RAEE, y analizar las posibilidades de proponer una ley en la que se establezcan restricciones, tratamientos y reciclaje adecuados de estos, es necesario examinar los diferentes países que han llevado el liderato en este importante tema. Además, al conocer los lineamientos que ya existen en México se podrán proponer mejoras en ellos.

Cada región del mundo a enfocado de diferente forma el manejo de los RAEE, sin embargo, la mayoría se ha dado cuenta de la gran problemática y consecuencias que tendrán de no hacer algo eficiente al respecto; por ello en este apartado se plantea la forma en que lo han realizado los diferentes países de cada continente y se analiza la situación en México.

### ***2.4.1. Convenios internacionales***

Existen dos vertientes o modelos básicos en los cuales están basadas las legislaciones de los diferentes países para abordar el tema legal de los RAEE.

- a) El primero es donde los productores toman la mayor responsabilidad, se conoce como el “Producer Take-Back” o ERP (Extended Producer Responsibility): esta está enfocada como una estrategia que asigna la responsabilidad compartida a los fabricantes de los productos, en la gestión del final de la vida útil de los RAEE, fomentando el diseño de productos que minimicen los impactos negativos en la salud humana y el medio ambiente en cada etapa del proceso (ciclo de vida del producto).
- b) El segundo es donde los consumidores toman más responsabilidad, ARF (Advanced Recycling Fees): enfoca como los principales actores a los consumidores, siendo los contribuyentes los responsables de los RAEE, por lo cual es necesario un impuesto que solvante los gastos del reciclaje de los AEE, liberando de responsabilidad a los fabricantes de estos productos.

El modelo de ARF, es discutido, debido a que toda la responsabilidad se ve reflejada sobre los consumidores, eximiendo a los productores de la responsabilidad de implementar diseños que sean más sustentables. (Rezagos, 2020).

En septiembre de 2015, las Naciones Unidas y todos sus Estados Miembros adoptaron la ambiciosa Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. En esta nueva agenda se plantearon 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y 169 metas para acabar con la pobreza, proteger el planeta y garantizar la prosperidad para todos a lo largo de los próximos 15 años.

El incremento del nivel de RAEE, la inadecuación, falta de seguridad de su tratamiento, así como su disposición en vertederos o por incineración plantea problemas significativos para el medio ambiente y la salud de las personas, así como para el satisfactorio cumplimiento de los ODS. (Baldé et al., 2017).

Existen dos convenios internacionales que han adoptado varios países en donde se establecen ciertos compromisos con fin de proteger el medio ambiente y la salud humana frente a los desechos peligrosos y contaminantes, estos son: el convenio de Estocolmo y el de Basilea.

➤ *Convenio de Estocolmo:*

El convenio de Estocolmo es un tratado internacional que fue incentivado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), cuyas metas son proteger la salud humana y el medio ambiente ante los contaminantes orgánicos persistentes (COP), de la misma forma el promover las mejores prácticas y tecnologías disponibles en fin de sustituir a los COP que se utilizan hoy en día, poder prevenir el desarrollo de nuevos COP a través de mejores legislaciones e instrumentación de planes nacionales de implementación para cumplir estos compromisos.

México aceptó y firmó el convenio el 23 de mayo de 2001, en Suecia, y lo ratificó el 10 de febrero de 2003. Fue el primer país de Latinoamérica que ratificó este convenio, el cual entró en vigor el 17 de mayo de 2004. (SEMARNAT, 2015).

➤ *Convenio de Basilea:*

El convenio de Basilea se planteó con el objetivo de tener un control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, así como reducir al mínimo la generación de estos desechos.

Este convenio ha dedicado gran parte de sus esfuerzos a lograr el manejo ambientalmente racional de los residuos electrónicos, aunque muchas de sus acciones, en principio, carecen de fuerza vinculante, se avanza en el sentido de involucrar a los países para que todos formen parte y en un futuro no lejano las decisiones en la materia puedan ser de carácter obligatorio.

Este convenio fue aceptado por la Conferencia de Plenipotenciarios, el 22 de marzo de 1989, mediante la firma de 116 países; México ratificó este convenio el 22 de febrero de 1991, siendo publicado en el Diario Oficial el 9 de agosto de ese mismo año, y las disposiciones generales fueron adoptadas el 5 de mayo de 1992, fecha de la entrada en vigor de este instrumento. Es el convenio con más historia en materia de residuos peligrosos y sustancias químicas. (SEMARNAT, 2015).

## 2.4.2. Marco legal internacional

### ➤ Europa:

La Unión Europea comenzó a implementar medidas respecto a los RAEE con la Directiva Europea 2002/96/CE, mencionado que los residuos de los RAEE es una de las primeras medidas esenciales acerca de su tratamiento adecuado, mostrando la necesidad de reducir la abundancia de estos. Promovieron el reúso y reciclado para valorizar los materiales con los que están fabricadas las computadoras y la forma de restringir el uso de sustancias peligrosas en estos aparatos electrónicos.

La Directiva Europea 2002/95/CE señala las restricciones de las sustancias químicas peligrosas como son: el cadmio, el cromo hexavalente, el mercurio, los Bifenilos Polibromados y el Difenil Éter polibromado; asimismo alude la protección de la salud humana, a la valoración de las partes metálicas con que está construida una computadora y la exclusión de esta adecuadamente. (RECÍCLAME, 2003).

En la Directiva Europea 2002/96/CE los RAEE fueron clasificados en 10 categorías, tabla 2.7:

Tabla 2.7. Clasificación de los RAEE directiva EU 2002

Nº	Categoría	Productos (Ejemplos)
1	Grandes electrodomésticos	Refrigeradores, congeladoras, lavadoras, lavaplatos, etc.
2	Pequeños electrodomésticos	Aspiradoras, planchas, secadores de cabello, etc
3	Equipos de informática y telecomunicaciones	Minicomputadoras, impresoras y computadoras personales, computadoras portátiles, fotocopiadoras, teléfonos, etc.
4	Aparatos electrónicos de consumo	Aparato de radio, televisores, cámaras de video, etc.
5	Aparatos de alumbrados	Luminarias, tubos fluorescentes, lámparas de descarga de alta intensidad, etc.
6	Herramientas eléctricas y electrónicas	Taladros, sierras y máquinas de coser.
7	Juguetes, equipos deportivos y de tiempo libre	Trenes y carros eléctricos, consolas de video.
8	Aparatos médicos	Equipo de radioterapia, cardiología, diálisis, etc.
9	Instrumentos de vigilancia y control	Termostato, detectores de humo o reguladores de calor
10	Máquinas expendedoras	Máquinas expendedoras de bebidas calientes, botellas, latas, productos sólidos.

(Directiva 2002/96/EC, 2002)

A pesar de estas medidas que se llevaron a cabo, la problemática de los RAEE no disminuyó en Europa, por lo que fue necesario modificar las directivas anteriores y realizar la Directiva 2012/19/UE, cuyos objetivos principales son los siguientes. (Directiva 2012/19/UE, 2012).

- Aportar a la generación y consumo sostenibles promoviendo la disminución de la producción de RAEE y que se impulsó la preparación para regresar a usar la directiva que establece que el avance en un tipo de diseño y producción de AEE que haga menos difícil la reparación de estos productos, su reutilización, desmontaje y reciclado.
- Hacer que la utilización de los recursos sea más eficiente, para reforzar el reciclaje y tener en consideración que es especialmente relevante el poder recuperar las diferentes materias primas contenidas en los residuos de este sector.
- Promover el correcto comportamiento medioambiental de los productores de AEE, los distribuidores y los consumidores, y en particular, de aquellos responsables directamente en los procesos de la recolección y adecuado tratamiento de RAEE.
- Tomar medidas en la agrupación de los RAEE en 6 categorías en vez de 10.

En la Directiva Europea 2012/19/UE los RAEE fueron clasificados en 6 categorías, tabla 2.8:

Tabla 2.8 Clasificación de los RAEE directiva EU 2012

Nº	Categoría	Productos (Ejemplos)
1	Aparatos de intercambio de temperatura	Frigoríficos, congeladores, aparatos de aire acondicionado, equipos de deshumidificación, bombas de calor, etc.
2	Monitores, pantallas, y aparatos con pantallas de superficie superior a los 100 $cm^2$	Pantallas, televisores, marcos digitales para fotos con tecnología LCD, monitores, ordenadores portátiles, etc.
3	Lámparas	Lámparas fluorescentes rectas, lámparas fluorescentes compactas, lámparas fluorescentes, lámparas LED, etc.
4	Grandes aparatos (con una dimensión exterior superior a 50 $cm^2$ ), incluidos, entre otros	Electrodomésticos; equipos de informática y telecomunicaciones; aparatos de consumo; luminarias; aparatos de reproducción de sonido o imagen, equipos de música, etc.
5	Pequeños aparatos (sin ninguna dimensión exterior superior a 50 $cm^2$ ), incluidos, entre otros	Electrodomésticos; aparatos de consumo; luminarias; aparatos de reproducción de sonido o imagen, equipos de música; herramientas eléctricas y electrónicas; juguetes, equipos deportivos y de ocio, etc.

<b>6</b>	Equipos de informática y telecomunicaciones pequeños (sin ninguna dimensión exterior superior a los 50 cm <sup>2</sup> )	Teléfonos móviles, GPS, calculadoras de bolsillo, encaminadores, ordenadores personales, impresoras, teléfonos, etc.
----------	--	--

(Directiva 2012/19/UE, 2012)

A partir del 2018, en el Artículo 7 de la directiva 2012/19/UE se establece que el índice de recolección mínimo, que deberá conseguir año tras año, es del 65% del peso medio de los AEE que sean introducidos en el mercado del Estado miembro del que se trate, en los tres años precedentes, o, alternativamente, del 85% de los RAEE producidos en el territorio de dicho Estado miembro (Baldé et al., 2020).

En la siguiente tabla 2.9 se observan los países europeos que además de seguir las directivas anteriores, tienen alguna ley o normativa específica, para el manejo adecuado de los RAEE, estas son basadas en los dos modelos básicos, abordados al principio de este apartado.

Tabla 2.9. Normativas en diferentes países europeos

<b>Alemania</b>	La ley ElektroG, asegura la eliminación reglamentaria y su reciclaje, por medio de los fabricantes, importadores o comerciantes, de los RAEE. Por esto los usuarios finales pueden dejar gratuitamente sus electrodomésticos en más de 1600 puntos de recolección regionales en Alemania (ACRR, 2012).
<b>Bélgica</b>	Las tres normativas regionales para el manejo de RAEE que entraron en vigor en el país en febrero de 2001 fueron tres Acuerdos de Política Medioambiental. Los productores tienen la responsabilidad de aceptar los RAEE. Además, los minoristas/distribuidores deben recibir los RAEE sin ningún costo. (ACRR, 2012).
<b>Noruega</b>	La normativa alusiva a los RAEE promulgada el 16 de marzo de 1998 entró en vigor el 1 de julio de 1999. Con esta normativa los fabricantes e importadores deberán garantizar que todo AEE que sea introducido en el mercado noruego, será recogido al final de su vida útil y se reciclará o, en su defecto, será manipulado correctamente (ACRR, 2012).
<b>Países bajos</b>	Decreto de 21 de abril de 1998, parcialmente en parte en vigor desde el 1 de junio de 1998 y entra en plena vigencia desde el 1 de enero de 1999. Los productores e importadores tienen que recuperar y reciclar RAEE por su cuenta. (ACRR, 2012).
<b>Suecia</b>	El dictamen sobre la Responsabilidad del Productor en los Productos Eléctricos y Electrónicos (2000:208) entró en práctica el 1 de julio de 2001. Responsabiliza al productor en los AEE. Fabricantes, minoristas e importadores tienen la responsabilidad en conjunto. (ACRR, 2012).

<b>Suiza</b>	El Reglamento sobre la Devolución, Recolección y Eliminación de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (OREA) entró en vigor desde el 1 de julio de 1998. Los fabricantes o importadores tienen la obligación de recoger los aparatos de su marca o de las marcas que comercialicen. Los minoristas deben recoger al cliente final los aparatos usados semejantes a los que venden (ACRR, 2012).
--------------	--

(ACRR, 2012)

➤ *Asia:*

En los últimos años la región del Asia Meridional ha comenzado a reconocer la importancia de una gestión de los residuos electrónicos. La India es el único país del Asia Meridional que tiene una legislación sobre los RAEE, a pesar que algunos otros países están planteando hacer lo mismo, en la India existen leyes desde 2011 sobre la gestión de estos residuos en las que establece que personas autorizadas para el desmantelamiento y reciclaje de residuos electrónicos. (Baldé et al., 2020).

En el sudeste asiático Filipinas tiene una serie de reglamentos sobre "residuos peligrosos" en los que se tratan los RAEE. En Asia Occidental y Central hay algunas leyes en vigor sobre las lámparas de mercurio. Sin embargo, en el caso de los residuos electrónicos, apenas hay recolección, legislación e infraestructura de tratamiento (Baldé et al., 2020).

- *China:*

China se ha convertido en el país con el mayor índice en la fabricación de productos AEE del mundo y al mismo tiempo en el eje central hacia dónde se dirigen gran parte de los RAEE a nivel mundial. Este país firmó el convenio de Basilea, sin embargo, la importación de estos RAEE aún continúa ocurriendo, debido a que no existe una amplia legislación internacional sobre residuos, (Rezagos, 2020).

En China se tiene una legislación nacional en vigor por la cual se pretende que se regule tanto la recolección y como el tratamiento de catorce tipos de residuos electrónicos, estos son: ordenadores personales, teléfonos móviles, teléfonos fijos, televisores, refrigeradores, lavadoras, acondicionadores de aire, campanas de cocina, calentadores de agua eléctricos, calentadores de agua a gas, máquinas de fax, impresoras, copiadoras y monitores (Baldé et al., 2020).

Además, China en 2019 generó 10,1 Mt de RAEE convirtiéndose en el principal productor mundial de estos residuos, de tal manera que el país desempeña un papel importante en el sector mundial de los AEE por dos razones principales: Primero es el país con mayor población del mundo, por lo que la demanda interna de esos aparatos es muy alta, y tiene una

sólida industria de fabricación en ese sector. Segundo, China desempeña un papel clave en el reacondicionamiento, reutilización y reciclaje de residuos electrónicos.

En este país el sector formal del reciclaje de RAEE ha mostrado un crecimiento considerable en cuanto a su calidad y capacidad de tratamiento, debido a la reglamentación sobre estos residuos y a la ampliación de sus instalaciones; cada año se desmantelan más de 70 millones de unidades de RAEE (Ministerio de Ecología y Medio Ambiente de China 2019).

- *Japón:*

En Japón se tienen múltiples leyes como: Basic Law For The Recycling Based Society, Waste Management Law, Law For The Effective Utilization Of Resources y Electric Appliances Recycling Law. Esta última hace obligatorio a los minoristas que venden aparatos eléctricos del hogar a aceptar los productos al final de su vida útil y al mismo tiempo obliga a los productores a reciclar. (Rezagos, 2020).

En su mayoría los productos de AEE recogen y reciclan en función de la Ley de reciclaje de determinados tipos de electrodomésticos (Act on Recycling of Specified Kinds of Home Appliances) y la Ley de promoción del reciclaje de pequeños residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (Act on Promotion of Recycling of Small Waste Electrical and Electronic Equipment). Japón fue uno de los pioneros en implementar un sistema de residuos electrónicos basado en la responsabilidad ampliada del productor. (Baldé et al., 2020).

- *India:*

En su Ley del Medio Ambiente faculta al gobierno central para constituir las medidas necesarias para la protección del ambiente con el fin de evitar y reducir la contaminación del país. En su Ley de Gestión y Manipulación y Movimiento Transfronterizos, reglamenta y busca soluciones, también explora alternativas para su eliminación y gestión ambiental. India es de los más grandes receptores de RAEE que exporta desde occidente. A pesar de esto el reciclaje y la recuperación de elementos valiosos de los desechos electrónicos se lleva a cabo de forma clandestina con condiciones desfavorables para los que la realizan además de generar una gran contaminación. (Rezagos, 2020).

- *Filipinas:*

Filipinas formuló un gran proyecto de directrices sobre el control ecológicamente racional de residuos de RAEE (Final Draft Guidelines on the Environmentally Sound Management (ESM) of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). (Baldé et al., 2020).

- *Camboya:*

El país tiene una ley específica para la gestión de residuos electrónicos gracias al sub-decreto de 2016 sobre la gestión de RAEE. El sub-decreto tiene todas las actividades relacionadas con la eliminación, almacenamiento, recolección, transporte, reciclaje y disposición de residuos de AEE. (Baldé et al., 2020).

➤ *África:*

- *Ghana:*

Al ser un país con bajo desarrollo y leyes muy pobres, se convirtió en un centro en donde países desarrollados vieron factible disponer sus desechos, en su mayoría AEE, aprovechando también la necesidad económica del país, de tal manera que los habitantes no les han quedado más que la opción de reciclar estos de una forma arriesgada y peligrosa con la incineración al aire libre, figura 4.3. (Europa Press,2008).

Sin embargo, en los últimos años se ha realizado la elaboración de diferentes leyes y se está tratando de aplicar directrices y técnicas adecuadas para una gestión respetuosa con el medio ambiente de los RAEE, destinadas a recolectores, centros de recolección, transporte, tratamiento y eliminación final. (Baldé et al., 2020). No obstante, es necesaria una legislación más sólida que proteja a este país vulnerable, para prevenir la importación de los RAEE al país, así como que los fabricantes se encarguen de los AEE al final de su vida útil.



Figura 2.25. Ghana, (dondereciclo, 2018)

Una investigación realizada en Nigeria muestra que, en 2015 y 2016, se importaron anualmente al país, por medio de los dos principales puertos, entre 60,000 y 71,000 toneladas de AEE usados. La mayoría de esos residuos importados tienen origen de países desarrollados como Estados Unidos, Reino Unido, Alemania, Bélgica, etc. Además, una prueba de funcionalidad básica mostró que, en promedio, al menos el 19% de los dispositivos no funcionaban. (Odeyingbo, Nnorom & Deubzer, 2017).

- *Nigeria:*

Este país no cuenta con una amplia legislación respecto a los RAEE, sin embargo, la Agencia Nacional para la Reglamentación y la Aplicación de las Normas Ambientales (NESREA) en colaboración con gobiernos de Europa, han expresado su interés de gestionar los RAEE con objetivo a tener un fin adecuado para estos residuos de la región africana (Rezagos, 2020). En Nigeria la responsabilidad ampliada del productor tomó importancia debido a la formación de la organización de responsabilidad de productores de residuos electrónicos (EPRON), una organización sin ánimo de lucro creada por los productores de electricidad y electrónica del país, que fue fundada en marzo de 2018 con la contribución de diferentes empresas interesadas como HP, Dell, Phillips, Microsoft y Deloitte cuyo fin es el de establecerse en Nigeria (Baldé et al., 2020).

A pesar de lo anterior, en la mayoría de los países africanos todavía no existe una legislación específica sobre la gestión de los RAEE. En el continente africano son pocos los países con legislación sobre RAEE (Egipto, Ghana, Madagascar, Nigeria, Rwanda, Sudáfrica, Camerún, Côte d'Ivoire), y a eso se debe considerar que el hacer cumplir la legislación es complicado.

➤ *América del norte:*

En el año 2016, la generación total de RAEE en América fue de 11,3 Mt, sin embargo, sólo se consta de la recolección y el reciclado de 1,9 Mt, de los cuales la mayor parte corresponden a América del Norte, siendo las zonas más ricas (E.U.A. y Canadá) que producen la mayoría de los RAEE en peso por habitante, que son alrededor de 20 kg/hab.

Además, E.U.A. y Canadá cuentan con legislación estatal y provincial, respectivamente, en materia de gestión de los RAEE, y son los que tienen mayor volumen de datos sobre éstos (Baldé et al., 2017).

- *Estados Unidos:*

El principal productor de residuos electrónicos de América es E.U.A. con 6,3 Mt, el segundo en importancia es Brasil con 1,5 Mt, y el tercero es México con 1 Mt aproximadamente. Los estudios estimativos de la UNU muestran que en E.U.A. se recogieron aproximadamente 1,4 Mt de residuos electrónicos, lo que supone el 22% del total generado, mientras que el paradero del resto de residuos electrónicos de Estados Unidos es prácticamente desconocido. (Baldé et al., 2017).

E.U.A. no cuenta con legislación nacional sobre la gestión de los RAEE, sin embargo, 25 estados y el Distrito de Columbia han promulgado su propia legislación al respecto. Estas leyes estatales difieren en su alcance y efecto, así como en si se prohíbe o no a los consumidores tirar los productos electrónicos en vertederos.

En total, dichas leyes cubren el 75-80% de la población de Estados Unidos, pero aún con esto, debido a las diferencias en la forma en que se aplican, en muchas zonas del país, incluidos estados con legislación al respecto, no se ofrecen oportunidades adecuadas de recolección de residuos. En 16 estados se prohíbe que la basura electrónica sea depositada junto a los residuos domiciliarios o depositada en vertederos. (Baldé et al., 2020).

En la mayoría de los estados se tiene el principio de responsabilidad extendida del productor (REP) a través de la cual los fabricantes y distribuidores son los encargados de gestionar los RAEE y financiar su recolección y reciclaje. Por otro lado, California establece la financiación con programas en donde por medio de los consumidores con un impuesto añadido al precio de compra del artículo. Este dinero luego es reembolsado a las empresas que realizaron un tratamiento de esta clase de residuos. (Rezagos, 2020).

Considerando únicamente a los productos del ámbito de la EPA, el índice de recolección para E.U.A. subiría al 70%. También es probable que parte de los RAEE se exporten a otros países, debido a que Estados Unidos no ha ratificado el Convenio de Basilea que detiene los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos. Se calcula que, en 2010, el 8,5% de las unidades obtenidas de computadoras, televisores, monitores y teléfonos móviles se exportaron como unidades enteras. (Baldé et al., 2017).

En años recientes ha habido un movimiento que nace a partir de las necesidades que ha surgido debido a la tecnología, producida por diferentes empresas, se ha vuelto más compleja, y los consumidores no tienen acceso a las herramientas de software necesarias para poder reparar los productos, ya que los fabricantes se oponen argumentando que infringe los derechos de autor.

- *Canadá:*

Canadá carece de una legislación nacional en vigor sobre el control de los residuos electrónicos, pero en 12 provincias y territorios se aplican reglamentos mediante programas administrados por la industria (todos menos Nunavut, el territorio menos poblado del país). En general, los productos a los que se les aplican las medidas es mucho más severo que en los Estados Unidos; incluso en muchas provincias canadienses existen requisitos de responsabilidad ampliada del productor, que pueden cumplirse siguiendo un plan sobre residuos electrónicos. (Baldé et al., 2020).

La Dirección Nacional de Principios para el Manejo de Productos Eléctricos y Electrónicos fue aprobada por el Canadian Council of Ministers of the Environment en junio de 2004. Brinda el acceso de los consumidores a los productos, su combinación, la designación de las responsabilidades de las partes, las metas de desempeño y las normas de reciclaje. Donde estos principios tienen un marco para el desarrollo y para implementar programas de RAEE en cada provincia. Además, establece los elementos clave necesarios para balancear los temas ambientales y con las económicas. (Rezagos, 2020).

➤ América del sur:

En América Latina sólo unos pocos países de la zona han logrado establecer leyes sobre RAEE, sin embargo, en los últimos 5 a 10 años, se ha progresado de forma relevante en la correcta aplicación de reglamentos y normas concretas sobre RAEE, pero el avance se limita a unos pocos países y, en cuanto a los demás, el camino que queda por recorrer es todavía muy largo y es necesario un mayor esfuerzo. Los países que están estableciendo las bases para empezar a aplicar un marco normativo oficial relativo a los residuos electrónicos son Brasil, Chile, Costa Rica, Colombia, México, y el Perú. (Baldé et al., 2020).

- *Brasil:*

Posee una Ley, que sitúa a cada persona la responsabilidad compartida con respecto de los RAEE. Aplica la responsabilidad a las tres esferas principales, el comercio, el municipio y el consumidor. Es el segundo generador más grande de RAEE en América con 1.5 Mt al año (UNESCO RELAC, 2010). Brasil publicó recientemente un acuerdo sectorial para aplicar un sistema de logística inversa destinado a los RAEE de los hogares para consulta pública. (Baldé et al., 2020).

- *Perú:*

En este país para regular la gestión y manejo de los RAEE se han promulgado normativas específicas (Decreto Supremo N° 001-2012-MINAM, Resolución Ministerial N° 200-2015-MINAM, Directiva N° 003-2013/SBN), donde se involucra a los diferentes actores: importadores, fabricantes, distribuidores, entidades estatales y operadores. Estas normativas promueven el manejo responsable de los RAEE con roles y obligaciones para los productores, entidades sectoriales, operadores de RAEE y generadores de RAEE. (SAR, 2017).

Además, el Ministerio del Ambiente ha impulsado planes públicos logrando juntar en las 2010 siete toneladas de RAEE en Lima, en el 2011 catorce toneladas y en el 2013 en Lima, Callao, Huancayo, Trujillo y Arequipa aproximadamente 22 toneladas, los que han sido reaprovechados y tratados de forma correcta por los operadores certificados de RAEE. En junio del 2012 fue publicado el Reglamento Nacional para la Gestión y Manejo de los Residuos, el cual declara las responsabilidades del sector privado y público para llevar a cabo los sistemas de manejo de RAEE en el país. (PERÚ Ministerio del Ambiente, 2018).

- *Chile:*

En este país se tiene la "Ley Marco para la Gestión de Residuos, Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje" promulgada en 2016, además se está trabajando en una regulación específica para los residuos electrónicos que incluirá objetivos

de recolección y reciclaje, estableciendo las directrices para la aplicación de sistemas de recolección formales. (Baldé et al., 2020).

- *Colombia:*

Colombia es el cuarto productor más grande de RAEE en América del sur produciendo cerca de 130,000 toneladas por año, de las cuales en el 2019 se recolectó 1.2 toneladas para ser recicladas. (EcoCómputo, 2019)

Existe una Gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos en donde se formuló acuerdos con los lineamientos y objetivos establecidos por la Ley 1672 de 2013 sobre RAEE y reunió en su diseño a los productores, fabricantes e importadores de este tipo de residuos, así como a los comercializadores, la sociedad civil en general los consumidores, las universidades, a los municipios, autoridades ambientales y autoridades del orden nacional. (MINIAMBIENTE, 2017).

Por otro lado, Colombia está en proceso una nueva reglamentación para dejar de dar la responsabilidad ampliada del productor a todas las categorías de residuos electrónicos y hacer cambios en el sistema de gestión integrada de estos residuos, tomando presentes las lecciones anteriores y las directrices establecidas en la Ley 1672 y la Política Nacional para la gestión integral de RAEE. (Baldé et al., 2020).

- *Argentina:*

Este país no ha tenido legislaciones sólidas respecto a los RAEE, pero presentó la Resolución 389/10 – RAEE, intentando basarse en la unión europea, donde sus artículos tienen por objetivos hacer una clasificación de estos residuos, tener un manejo adecuado, fomentar el reciclaje, reutilización y evitar métodos de relleno sanitario, así como abandono, vertido o eliminación incontrolada de los RAEE en el ámbito de la Provincia de Buenos Aires. (UNESCO RELAC, 2010).

### ***2.4.3. Marco legal nacional***

A México le hace falta una legislación que obligue a las empresas que fabrican los AEE para hacerse cargo del tratamiento y disposición final de los residuos, ya que sólo existe la responsabilidad compartida y diferenciada; por ello los fabricantes son exculpados de los RAEE que son consecuencia de sus propios productos.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), secretaría responsable de la regulación ambiental, además de impulsar proyectos de manejo de estos desechos en el Plan Nacional de Residuos, sin aplicación actual alguna. La Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 expone las características de los residuos

peligrosos, así como una enumeración y los límites que hacen peligroso a un residuo, colocando a los RAEE como parte de ellos.

Sin embargo, México carece de una norma oficial para determinar la metodología necesaria respecto al manejo de los RAEE, además de una ley para su reciclaje, no obstante, el país tiene una ley de gestión integral de los residuos, en la cual quedan situados RAEE, esta ley tiene el nombre de “Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), la información de los residuos electrónicos se encuentra en el artículo 19, fracción VIII de esta ley, esta se refiere a la protección del medio ambiente en materia de prevención y gestión de los residuos peligrosos en todo el país, figura 4.6. (PROFEPA, 2016).

Tiene por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación nacional. (PROFEPA, 2016).



Figura 2.26. Residuos peligrosos, (Cristina, A., 2019).

Por otro lado, la NOM-161-SEMARNAT-2011, establece criterios para catalogar a los Residuos de Manejo Especial (RME) y determinar cuales estarán determinados a un plan de manejo. El plan de manejo son instrumentos que tienen como objetivo minimizar la generación y maximizar la valorización de los RME, pero no indica quien debe aprovecharlos y que deben hacerse con ellos. (Peralta, L., 2012).

## **2.5. Introducción al plan de manejo**

Existen diversos RAEE, como se ha visto anteriormente, que contienen diferentes componentes y están hechos de diferentes materiales, por ello cada material involucra un proceso específico de revalorización y tratamiento que permita recuperarlo y devolverlo al ciclo productivo (Insignares, F., 2019). El proceso de minería electrónica para un correcto tratamiento de los RAEE normalmente se divide en cuatro etapas generales: la recolección de los RAEE, su clasificación y separación, el tratamiento final (incluyendo el refinado de los metales), y la disposición de los residuos peligrosos (Rosas, M, 2012).

- *Recolección de los RAEE*
- *Clasificación y separación*
- *Técnicas de tratamiento*
- *Disposición de los residuos peligrosos*

### **2.5.1. Fases del proceso del manejo integral**

- *Recolección de los RAEE*

La recolección de los residuos consiste en efectuar su traslado a basureros o a las plantas de procesado y tratamiento. El proceso de recolección de basura se puede dividir en colecta, transporte, y entrega.

En la etapa de recolección lo ideal es que sea selectiva de los diferentes tipos RAEE, por ello actualmente en México existen programas como el de Reciclación antes mencionado. Sin embargo, todos los días se recolectan residuos de diferentes puntos como escuelas u oficinas y en cada uno de ellos se desechan diferentes materiales que deben ser tratados especialmente. Por esta razón, es importante canalizar la recolección y el reciclaje de estos residuos. (Reina, S., 2021)

- *Clasificación y separación*

Una vez que son entregados, al momento de almacenarlos es necesario que sean clasificados para ser tratados de manera acorde, figura 2.27. Para ello se recomienda la clasificación similar al modelo adoptado por la UE en su directiva 2012/19/UE donde son separados en 6 categorías, de manera que al haber varios RAEE, esto lo simplifica en gran manera.



Figura 2.27. Clasificación, (RETEMA, 2017)

1. Aparatos de intercambio de temperatura: En esta categoría se busca juntar a los RAEE que generan calor o frío, figura 2.28, como lo son los frigoríficos, congeladores, aparatos de aire acondicionado, equipos de deshumidificación, bombas de calor, entre otros. De ellos se espera extraer gran cantidad de metal y poco plástico.



Figura 2.28. Aparatos de intercambio de temperatura, (123RF, 2018)

2. Monitores y pantallas: Ejemplos de esta categoría de los RAEE son pantallas, televisores, marcos digitales para fotos con tecnología LCD, monitores, entre otros. Buscando extraer principalmente el vidrio, cobre y los plásticos de estos. Figura 2.29.



Figura 2.29. Monitores, (Usera, J., 2019)

3. Lámparas: Se catalogan diferentes tipos de lámparas fluorescentes rectas y compactas, lámparas LED, focos, entre otros. Figura 2.30. Buscando extraer principalmente el vidrio y los plásticos de estos.



Figura 2.30. Focos, (EL PAÍS, 2017)

4. Grandes aparatos: (Dimensión superior a  $50 \text{ cm}^2$ ): Ejemplo de esta categoría son electrodomésticos, equipos de informática y telecomunicaciones, aparatos de consumo, aparatos de reproducción de sonido o imagen, equipos de música, etc. Figura 2.31. Se espera extraer la mayor cantidad de metal, plásticos, vidrio y tarjetas electrónicas.



Figura 2.31. Aparatos grandes, (Mexis,2016)

5. Pequeños aparatos (Sin ninguna dimensión exterior superior a  $50\text{ cm}^2$ ): Ejemplo en esta categoría son electrodomésticos, aparatos de consumo, aparatos de reproducción de sonido o imagen, equipos de música, herramientas eléctricas y electrónicas, juguetes, equipos deportivos y de ocio, etc. Se espera extraer la mayor cantidad de metal, plásticos, vidrio y tarjetas electrónicas, pero en menor cantidad que los aparatos grandes. Figura 2.32.



Figura 2.32. Pequeños aparatos, (Herramienta Electrónica, 2019)

Nota: Dentro de esta categoría se podrían incluir herramientas básicas o juguetes que a pesar de no ser AEE, tienen los mismos componentes que se desean reciclar como son los plásticos y metales.

6. Equipos de informática y telecomunicaciones pequeños (Sin ninguna dimensión exterior superior a  $50\text{ cm}^2$ ): Teléfonos móviles, GPS, calculadoras de bolsillo, encaminadores, ordenadores personales, impresoras, teléfonos, entre otros, de los cuales se busca extraer los plásticos, metales y tarjetas electrónicas para darles un tratamiento específico. Figura 2.33.



Figura 2.33. Equipos de informática y telecomunicaciones, (Merindad, 2018)

➤ *Técnicas de tratamiento*

En esta fase del proceso de reciclaje, una vez que se tienen los componentes desmontados y separados, se canalizarán a las diferentes líneas donde se aplicarán las técnicas dependiendo del componente y de los materiales que se espera recuperar. Existen diferentes técnicas que son posibles aplicar a los RAEE para poder recuperar la materia prima valiosa de estos componentes.

Debido a que sería prácticamente imposible crear una línea de producción inversa, es necesario hacer uso de técnicas para facilitar la separación de componentes que son valiosos, como los procesadores que pueden estar soldados o integrados, entre otras formas de fabricación.

- *Trituración:*

En la trituración se busca reducir el volumen de los materiales, para obtener un material homogéneo, como en la trituración de plástico, o heterogéneo facilitando la separación de los materiales, que subsecuentemente serán procesados por otras técnicas para obtener mayor separación. Figura 2.34.



Figura 2.34. Trituración de materiales valiosos, (UNTHA,2020)

Esta técnica de separación es utilizada principalmente para el plástico y el vidrio. En el caso del vidrio triturado atraviesa con ayuda de lectores ópticos eliminan cualquier resto de otro material, así consiguiendo el calcín.

- *Proceso de separación magnética y por aire:*

Cuando se tritura el material se puede emplear la separación magnética, esto para los componentes férricos, figura 2.35 y los que no lo son. Se utiliza la separación por aire, figura 2.36, a través de la diferencia de densidad de los elementos, este método permite la separación de los siguientes materiales. (Khaliq, A., Akbar, M., 2014):

- Fracción ligera con poca cantidad de Cu y Metales Preciosos (MP); 8-10%
- Fracción ferrosa: 12-25%
- Concentrado de Cu y MP, con Au hasta 1.3 kg/
- Concentrado de latones: 1-5%
- Concentrado de aluminio: 1.5%

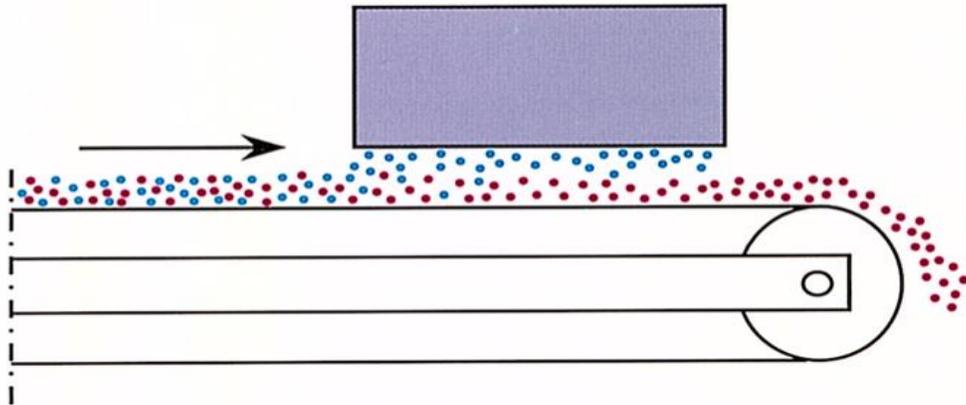


Figura 2.35. Separación de materiales, (Anales sectoriales, 2017)



Figura 2.36. Separación por aire, (Ambisort, 2021)

- *Proceso de enfriamiento criogénico*

Este proceso consiste en enfriar la materia prima con nitrógeno o aire enfriado, para hacer más fácil su trituración teniendo fracciones de 0.2-5.0 mm, figura 2.37. Este efecto es favorecido por las partes metálicas, las partes de plástico y goma poseen diferentes coeficientes de dilatación térmica. Cuando termina este proceso, se procede a utilizar la gravitación de la fracción con mayor peso, la cual contiene los metales preciosos. (Khaliq, A., Akbar, M., 2014).



Figura 2.37. Refrigeración criogénica, (Anales sectoriales, 2016)

- *Proceso de disolución en mezcla ácida*

La mezcla de ácidos concentrados, como el ácido nítrico o el ácido clorhídrico, en una proporción indicada, da como resultado un líquido muy corrosivo, que hay que emplear con el debido cuidado. Estos líquidos pueden disolver al oro, y a otros metales nobles, debido a que uno de los ácidos (nítrico) actúa como agente oxidante, y el otro (clorhídrico) contribuye al proceso por la capacidad complejante del anión cloruro. El efecto conjunto de la mezcla es la disolución del metal noble, algo que no es posible de conseguir actuando los ácidos por separado. (Hernandez, M., 2019).

- *Proceso Piro-metalúrgico*

Los procesos pirometalúrgicos, se pueden utilizar para la extracción y refinación de los metales, por medio del uso de calor, a muy altas temperaturas como se lleva a cabo en la fundición. Por lo que este es un método muy común en la obtención de sólidos inorgánicos, ya que elimina la ganga que son sales u otros compuestos que nos son de interés logrando así aprovechar el metal. Cabe resaltar que estos procedimientos son sumamente contaminantes para el medio ambiente (Méndez, A., 2010).

- *Proceso de calcinado*

Este proceso trabaja al calentar una sustancia a altas temperaturas comúnmente con fuego, llegando a una temperatura de descomposición, para ocasionar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química.

El objetivo del calcinado de los componentes electrónicos es hacer del Cu el material colector, pero como objetivos principales, este proceso sirve para poder recuperar materiales de bajo punto de fusión, como el estaño, plomo y para eliminar parcialmente materiales plásticos. (Khaliq, A., Akbar, M., 2014).



Figura 2.38 Proceso de calcinado, (lifeder, 2019)

- *Extrusión*

La extrusión de polímeros es un proceso industrial mecánico, en donde se realiza una acción de moldeado del plástico que, por flujo continuo con presión y empuje, se lo hace pasar por un molde encargado de darle la forma deseada. Se utiliza para transformar masas de conformación de plástico en mangueras, láminas o tubos de gran longitud. Para ello, el material plastificado se prensa de forma continua a través de una herramienta de moldeo. (Motan colortronic, 2019).

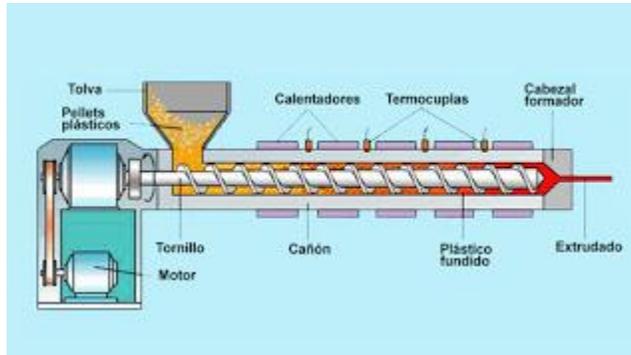


Figura 2.39. Extrusión de materiales plásticos, (tecnología de los plásticos, 2011)

- *Reciclaje general de plástico, vidrio y metales:*

Dependiendo del material a reciclar es conveniente utilizar una o varias técnicas anteriormente mencionadas, para el plástico, vidrio, y metales, se procede de la siguiente manera:

- *Plásticos:*

El reciclado del plástico está en función de la clasificación de los diferentes tipos de polímeros. En su mayoría las personas que se dedican a reciclar utilizan la separación manual, A pesar de esto se está implantando la identificación de los polímeros mediante rayos X y sensores de luz visible o rayos infrarrojos. Por otro lado, existen otros sistemas mecánicos por mencionar algunos como la clasificación por aire, flotación o separación electrostática o espectroscopia. A su vez también se usan los procesos de sustancias químicas que separan los polímeros y eliminan agentes contaminantes.

La clasificación toma en cuenta las características como color, peso, tamaño, origen, como de qué equipo electrónico es el plástico, espesor del material, además en algunos casos la marca del equipo que fabricó este ahora residuo electrónico (Lagos, G., 2010).

- *Vidrio:*

Es complicado lograr identificar y separar los productos que contienen elementos de vidrio, debido al contenido de metales pesados en estos materiales, como en monitores y televisiones. En el caso del tubo de rayos catódicos este se divide en vidrio de pantalla junto con bario y estroncio, y una segunda parte en vidrio cónico del embudo, el cual posee un elevado contenido en plomo.

Se utilizan métodos mecánicos y térmicos para la separación y reciclaje de los vidrios, y a su vez combinados con métodos químicos, esto para la recuperación de posibles polvos que generan algunos metales (Lagos, G., 2010).

- *Metales:*

Primero se realiza una separación en donde se establece si entra en el grupo de metales ferrosos como por ejemplo el hierro o el acero o no ferrosos como el aluminio, cobre y metales preciosos. Para lograr esto se utiliza una imantación sencilla para encontrar a los metales ferrosos de los no ferrosos. Para recuperar los metales se puede hacer mediante trituración, incineración o enfriamiento. Existen procesos químicos que permiten separar los metales preciosos, como el oro y la plata, de las tarjetas de circuitos impresos, por ejemplo, el proceso de disolución en mezcla ácida (Lagos, G., 2010).

- *Oro:* Es un metal precioso por excelencia, en la producción mundial, el 50% del oro se destina a las joyerías, el 40% se utiliza en reservas e inversiones y el 10 % se emplea en la industria. El oro en las computadoras se encuentra en cantidades mínimas, no obstante, el consumo y el malgasto de estos dispositivos implica el derroche de este recurso. El oro presente en las placas es de alto interés (Lagos, G., 2010).
- *Cobre:* Sus propiedades son interesantes como el segundo mejor conductor después de la plata y seguido del oro y el aluminio. El cobre es el material más utilizado para diversas aplicaciones como en el caso de conducir y disipar el calor en los radiadores de los vehículos. El cobre es 100 % reciclable, además, no pierde sus propiedades químicas y físicas al reciclar (Lagos, G., 2010).

#### ➤ Manejo de los de los residuos peligrosos

En la última etapa del proceso es necesario manejar los residuos de las técnicas de tratamiento, los cuales son considerados peligrosos y por lo tanto se deben seguir las leyes y normativas correspondientes al país. Estas leyes indican el procedimiento aprobado para tratar o disponer estos residuos.

En México se tiene la (LGPGIR) la cual contiene información de los residuos electrónicos en su artículo 19, fracción VIII, que se refiere a la protección del medio ambiente en materia de prevención y gestión de los residuos peligrosos en todo el país (PROFEPA, 2016).

En la NOM 160 de SEMARNAT establece los elementos y procedimientos para formular los planes de manejo de residuos peligrosos. Establece que un generador de residuos peligrosos en industrias, comercios o servicios tiene la responsabilidad de manejarlos conforme a las leyes vigentes, ya sea por sus propios medios o compartir con los prestadores de servicios autorizados. Siendo un problema el coordinar que hacer con los RAEE ya que al final de su vida útil acaban en la mano de los usuarios y estos sin saber disponen estos residuos como cualquier otro a pesar de que como ya se mencionó en el apartado de impactos los RAEE son residuos peligrosos. (SEMARNAT, 2011).

La NOM-052-SEMARNAT-2005 es la Norma Oficial Mexicana que establece el procedimiento que se debe seguir para poder reconocer si un residuo es peligroso, tomando como pauta el acrónimo CRETIB, tabla 2.10. (SEMARNAT, 2005).

Tabla 2.10. CRETIB

<b>Identificador</b>	<b>Definición</b>	<b>Ejemplo</b>
C: Corrosivo	Capacidad de un compuesto de disolver a otro. Se indica con ayuda del pH.	Ácidos fuertes, bases fuertes, hidracina.
R: Reactivo	Residuos inestables que pueden poseer un problema explosivo en alguna etapa dentro del ciclo de manejo de estos residuos.	Magnesio, nitratos, metales alcalinos, magnesio
E: Explosivo	Capacidad de las sustancias químicas de una liberación de presión, gas y calor a temperatura, provocado por un choque repentino, presión o alta temperatura.	Ácido péctico, cloratos, peróxidos, trinitrotolueno.
T: Tóxico	Capacidad de una sustancia para producir afectaciones en los tejidos vivos, daños en el sistema nervioso central, enfermedad grave o en casos extremos la muerte, cuando se ingiere, inhala o se absorbe a través de la piel.  a) Te: Toxicidad Ambiental: Sustancia o mezcla de sustancias que puede ocasionar un desequilibrio ecológico.  b) Th: Toxicidad aguda: Sustancias o mezcla que pueden provocar, en un corto periodo de tiempo daños o la muerte de un organismo.	Plomo, arsénico y sales, plaguicidas.

	c) Tt: Toxicidad Crónica: Sustancia o mezcla que tiene efectos dañinos a largo plazo en los organismos, a partir de exposiciones continuas y que pueden producir efectos cancerígenos, teratogénicos o mutagénicos.	
I: Inflamable	Facilidad que presenta un gas, líquido o sólido para encenderse, así como la rapidez con que, una vez encendido, se diseminarán sus llamas.	Alcoholes, cetonas, éteres y aldehídos, hidrocarburos aromáticos.
B: Biológico-Infecioso	Residuo que contiene bacterias, virus u otros microorganismos con la capacidad de provocar infección.	Gasas con sangre, algodones utilizados para inyecciones, jeringas.

(García, L, 2018)



Figura 2.40. Clasificación de residuos peligrosos, (ISASIT,,2018 )

## 2.5.2 Logística Inversa y sistemas suaves

### ➤ Logística Inversa

De acuerdo con Martin Christopher, la logística es el proceso de manejar de forma estratégica la procuración, movimiento y almacenamiento de materiales (recursos), partes e inventario de producto terminado, mediante la organización y sus canales de mercadotecnia maximizando la rentabilidad actual y futura por medio de la culminación de órdenes que sean efectivas en cuanto a costo. (Christopher, M., 2003).

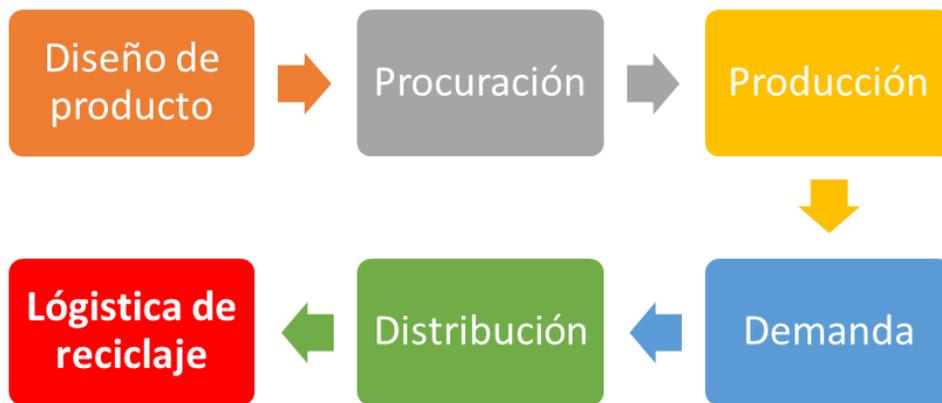


Figura 2.41. Diagrama de logística, (Elaboración propia, 2022)

Existen dos tipos de logísticas: directa e inversa, que dependen de cuál es su punto de inicio y final de la cadena; y además de sus respectivos retos operacionales. Para la logística directa, la distribución es hacia delante de los productos, desde el productor hasta el cliente, el objetivo del sistema logístico es lograr proveer el producto correcto, en el lugar, tiempo, condición y costo correcto.

La logística inversa según el Reverse Logistic Executive Council se define como el proceso de manejar bienes desde su destino final tradicional a otro punto, teniendo como finalidad el capturar valor de estos, que de otra forma no estaría disponible, para la disposición apropiada de dichos bienes (productos).

La logística inversa sirve para recuperar los productos de manos del consumidor y darles un reuso o reciclado, extendiendo así la cadena de valor del producto. La recolección de los RAEE utilizados está en este esquema y es el utilizado para la propuesta de plan de manejo realizada (Rosas, M., 2012).

➤ *Sistemas Suaves*

Los sistemas suaves son aquellos en que se toma principalmente la parte social. El comportamiento del individuo o del grupo social que toma un sistema teleológico, con fines, con voluntad, un sistema pleno con algún propósito, capaz de desplegar comportamientos, actitudes y aptitudes múltiples. El comportamiento no sólo hay que describirlo, hay que explicarlo para conocerlo y darle su propio lugar. Los problemas en los sistemas suaves no tienen estructura identificable con facilidad ya que dependen de varios factores variables (Rosas, M., 2012).

La metodología de sistemas suaves (MSS) fue desarrollada por Peter Checkland con el propósito de ocuparse de problemas sociales, y esta se divide generalmente en siete etapas:

1. *Situación Problema no Estructurada*: Esta etapa se centra en encontrar hechos de la situación problema.
2. *Situación Problema Estructurada*: Se recoge y clasifica la información para darle una estructura con el fin de expresarla en una “figura enriquecida”, usando algún tipo de diagrama.
3. *Nombramiento de los Sistemas Relevantes*: Se analizan perspectivas diferentes al observar la situación problema, para poder seleccionar una visión de la situación y producir una “definición raíz”.
4. *Construcción de Modelos Conceptuales*: Se consideran todas las necesidades del sistema para cada una de las definiciones raíz planteadas.
5. *Comparación del Modelo Conceptual contra la Realidad*: Se debe comparar los resultados de los pasos 2 y 4 para observar donde hay diferencias y similitudes.
6. *Evaluar el Modelo Conceptual*: Se deben identificar los cambios factibles y deseables, esta etapa se enfoca en la definición de los cambios que se buscan aplicar al sistema, las restricciones o límites a las que se enfrenta son la posibilidad de su aplicación y que sean una solución al problema.
7. *Puesta en Marcha de los Cambios*: Su objetivo es pasar a la práctica el sistema, así como los cambios identificados que buscan resolver el problema. Es un proceso iterativo ya que requiere seguir los pasos varias veces para producir resultados óptimos.

## **Capítulo III Justificación de la Propuesta del Plan de Manejo Integral de los RAEE**

---

### **3. Capítulo III Justificación de la Propuesta del Plan de Manejo de los RAEE**

Un correcto plan de manejo de los RAEE debe considerar los factores expuestos en el capítulo anterior, por ello es necesario analizar la información mediante un análisis de datos utilizando diferentes algoritmos, para tener mejor entendimiento de la problemática y las necesidades que existen, así como los diferentes patrones de comportamiento.

Por ello en este capítulo se muestra la generación existente de RAEE en el mundo y en México, así como proyecciones a futuro que demuestran que puede llegar a ser insostenible en caso de no tomar medidas; también se hicieron comparativas de generación de RAEE, de los países que implementan leyes o estrategias, los que reciclan y recogen, para dar a entender cómo se relaciona el nivel de industrialización, la población y las leyes de estos países.

#### ***3.1 Implementación del análisis de datos***

Para poder comprender de mejor manera la situación general de los RAEE en el mundo y en México, así como la problemática que presentan y los beneficios de realizar minería electrónica, se realizó un análisis de la información obtenida en diferentes conjuntos de datos, como se explicó en el capítulo II se implementaron algoritmos de regresión lineal y agrupamiento K-means para el análisis de datos, para ello se usó la librería de Python “Scikit-learn (Sklearn)” que proporciona una selección de herramientas eficientes para el aprendizaje automático y el modelado estadístico que incluyen clasificación, regresión, agrupación y reducción de dimensionalidad (Scikit-learn, 2019).

*Nota: El código de Python utilizado para el análisis de datos se encuentra en el anexo 1, y los conjuntos de datos usados en el anexo 2.*

##### ***3.1.1 Regresión lineal de los RAEE generados en el mundo***

Con los datos registrados por el observatorio mundial de los residuos electrónicos 2020 sobre la generación de RAEE en el mundo por año, desde el año 2014 hasta el 2019, se realizó un pronóstico con regresión lineal para proyectar la generación de RAEE en el mundo en los próximos años (Baldé et al., 2020).

La distribución de los datos de generación de RAEE en el mundo por año, de 2014 a 2019, se puede observar en la figura 3.1, y los datos de generación de RAEE por habitante anualmente en los mismos años en la figura 3.2.



Figura 3.1. RAEE generados de 2014 a 2019 en el mundo, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

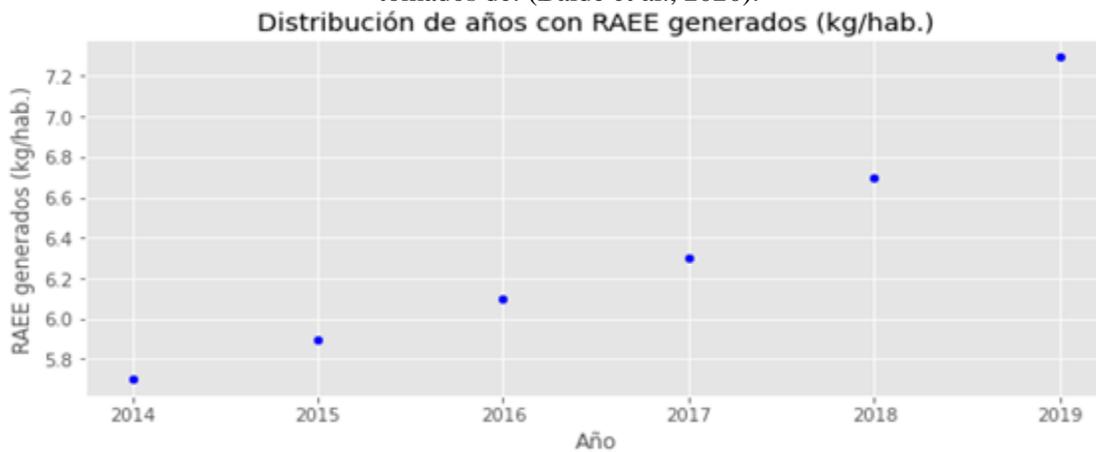


Figura 3.2. RAEE generados por habitante de 2014 a 2019 en el mundo, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

La distribución de los datos es casi lineal, por lo que ajustar un modelo de regresión lineal es posible y, como en todo estudio predictivo, no solo es importante ajustar el modelo, sino también cuantificar su capacidad para predecir nuevas observaciones. Para poder hacer esta evaluación, se dividen los datos en dos grupos, uno de entrenamiento y otro de prueba, después se procede a generar el modelo de regresión lineal correspondiente.

Con el modelo generado para los RAEE generados en el mundo por año se obtuvo una pendiente  $\beta_1 = 2597.44$  con ordenada al origen  $\beta_0 = -5191613.25$ , coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9825$ , error absoluto medio MAE = 129.53 y RMSE = 129.53.

$R^2$  tiene la propiedad útil de que su escala es intuitiva, va de 0 a 1, con 0 indicando que el modelo propuesto no mejora la predicción sobre el modelo medio y 1 indica una predicción casi perfecta. RMSE indica el ajuste absoluto del modelo a los datos, cuán cerca están los

puntos de datos observados de los valores predichos del modelo. Los valores más bajos de RMSE indican un mejor ajuste.

En el modelo para los RAEE generados por habitante anualmente se obtuvo una pendiente  $\beta_1 = 0.3$  con ordenada al origen  $\beta_0 = -598.6$ , coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9264$ , error absoluto medio MAE = 0.049 y RMSE = 0.07.

Con ambos modelos de regresión lineal obtenidos se realizó la predicción para los años 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, produciendo los resultados que se pueden observar en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Predicciones de RAEE generados en el mundo y por habitante.

Año	RAEE generados (Kt)	RAEE generados (kg/hab.)
2014	40000	5.70
2015	42235	5.90
2016	44700	6.10
2017	46935	6.30
2018	49170	6.70
2019	53600	7.30
2020	55219	7.40
2021	57816	7.70
2022	60414	8.00
2023	63011	8.30
2024	65609	8.60
2025	68206	8.90
2026	70803	9.20
2027	73401	9.50
2028	75998	9.80
2029	78596	10.10
2030	81193	10.40
<b>Total</b>	<b>1026906</b>	<b>135.90</b>

(Elaboración propia, 2021)

Los datos de la tabla 3.1 se graficaron para una mejor comprensión de la información. Se puede observar en la figura 3.3 que dado el crecimiento de los años anteriores se proyecta un modelo lineal en donde año tras año este crecerá en millones de toneladas métricas generadas de RAEE y de manera proporcional los kilogramos producidos por habitante, y esto sin considerar el aumento poblacional, dando a entender que mientras los avances tecnológicos persistan y no se apliquen las medidas necesarias para cambiar la situación insostenible de estos residuos, el aumento no se detendrá.

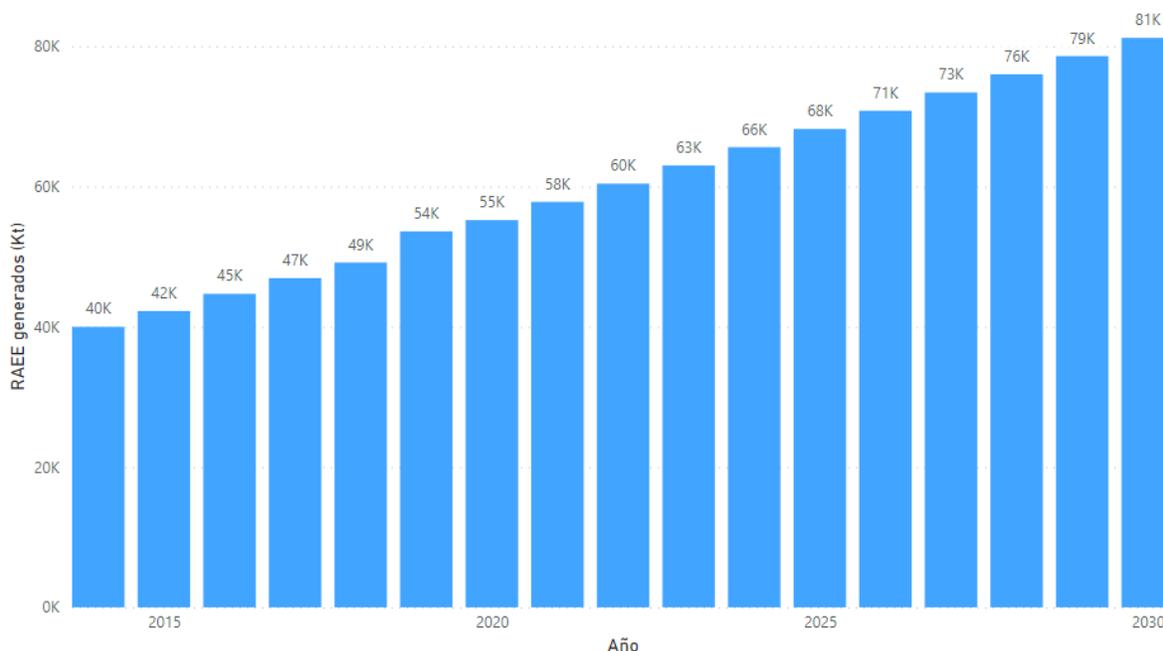


Figura 3.3 Predicción de RAEE generados en el mundo de 2014 a 2030, (Elaboración propia, 2021)

De continuar así, proyectando para el 2050 y 2100 se generarán 133,142 kt y 263,014 kt de RAEE respectivamente con 16.4 (kg/hab) y 31.4 (kg/hab) anualmente, lo cual es alarmante y hace ver la necesidad de tomar en cuenta medidas para el correcto tratamiento de estos residuos, ya que no es sostenible este modelo, tanto en la producción, por la falta de materia prima, así como el daño al ambiente. Además, tal generación de RAEE muestra que implementar la minería electrónica puede ser tanto una oportunidad económica como medida para un correcto tratamiento de estos residuos.

### ***3.1.2 Regresión lineal de los RAEE generados en México***

Aplicando el procedimiento anterior con los datos proporcionados por el Gobierno de México sobre la generación de RAEE anualmente, desde 2015 hasta 2020, se realizó un pronóstico con regresión lineal para proyectar la generación de RAEE en México para los próximos años (Gobierno de México, 2020).

La distribución de los datos de generación de RAEE en México por año, de 2015 a 2020, se puede observar en la figura 3.4.



Figura 3.4. RAEE generados de 2015 a 2020 en México, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Gobierno de México, 2020).

La distribución de los datos es casi lineal, por lo que ajustar un modelo de regresión lineal es posible y, como en todo estudio predictivo, no solo es importante ajustar el modelo, sino también cuantificar su capacidad para predecir nuevas observaciones. Para poder hacer esta evaluación, se dividen los datos en dos grupos, uno de entrenamiento y otro de prueba, después se procede a generar el modelo de regresión lineal correspondiente.

Con el modelo generado para los RAEE generados en México anualmente se obtuvo una pendiente  $\beta_1 = 38.19$  con ordenada al origen  $\beta_0 = -75901.62$ , coeficiente de determinación  $R^2 = 0.99$ , error absoluto medio  $MAE = 2.91$  y  $RMSE = 2.91$ .

Con los modelos de regresión lineal obtenidos se realizó la predicción para los años 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, produciendo los resultados que se pueden observar en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Predicciones de RAEE generados en México.

Año	RAEE generados (Kt)
2015	1065
2016	1106
2017	1146
2018	1183
2019	1220
2020	1256
2021	1295
2022	1334
2023	1372
2024	1410
2025	1448
2026	1486
2027	1525
2028	1563
2029	1601
2030	1639
<b>Total</b>	<b>21649</b>

(Elaboración propia, 2021)

Los datos de la tabla 3.2 se graficaron para una mejor comprensión de la información. Se puede observar en la figura 3.5 que el modelo de regresión lineal resulta más lineal que los modelos aplicados anteriormente, dado que los datos se ajustan de mejor manera, lo cual refleja que en México el crecimiento de los RAEE al año tendrá un aumento constante aproximado del 3%.

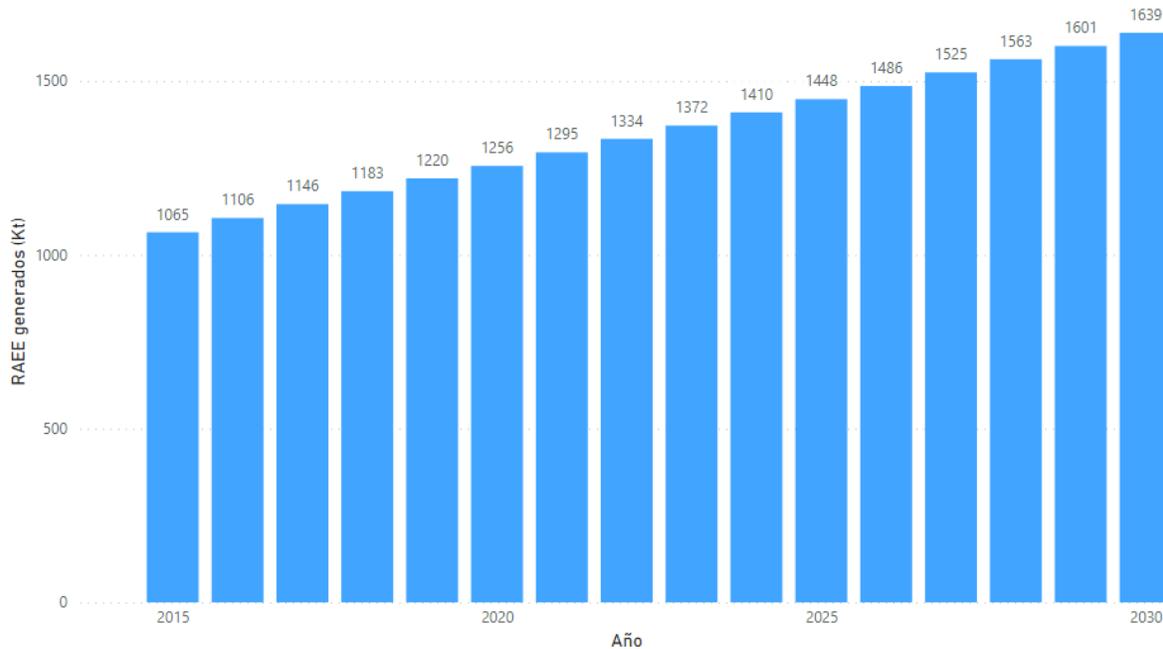


Figura 3.5. Predicción de RAEE generados en México de 2015 a 2030, (Elaboración propia, 2021)

### 3.1.3 Agrupamiento K-Means de RAEE por 180 países

Con los datos registrados por el observatorio mundial de los residuos electrónicos 2020 sobre la generación de RAEE por 180 países en 2019 se implementó el algoritmo k-means para obtener una mejor comprensión de los datos y así poder analizarlos agrupándolos por grupo (clúster) con características similares (Baldé et al., 2020).

Antes de implementar el algoritmo K-means se analizó el conjunto de datos disponible, generando gráficos de los datos para un mejor entendimiento. Para el mapa de la figura 3.6, se dividió por color los países de cada continente, además el tamaño del círculo en el mapa, correspondiente a cada país, es proporcional a la cantidad de RAEE generados por el mismo en 2019.

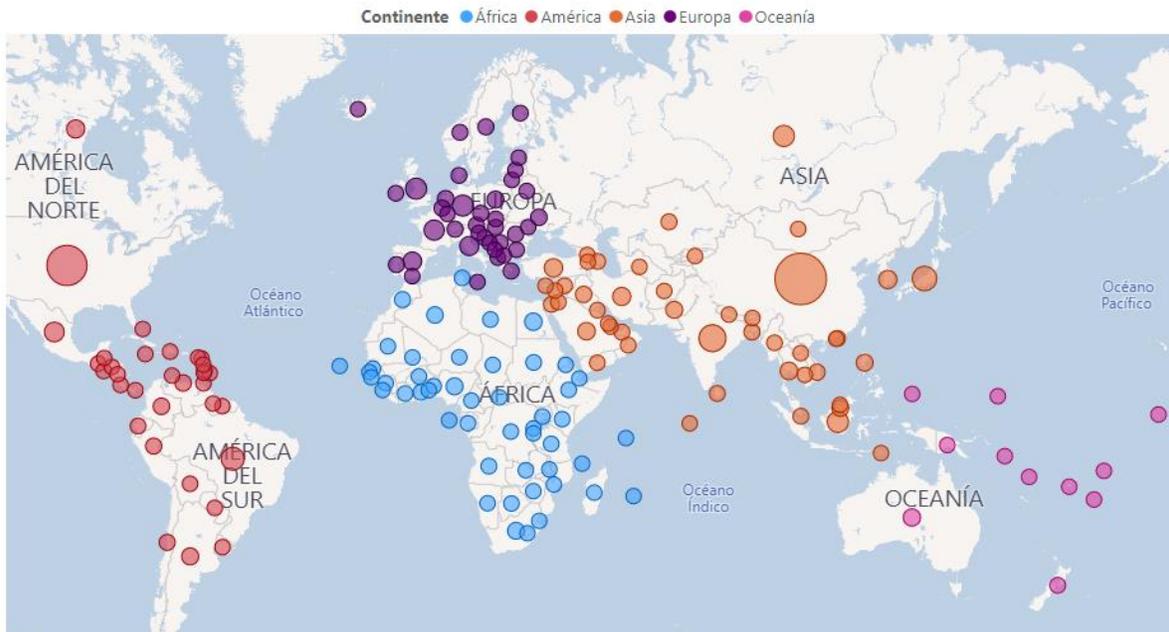


Figura 3.6. RAEE generados por 180 países en 2019, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

De la figura 3.6 se puede observar que en los países más desarrollados existe mayor cantidad de toneladas métricas de RAEE generados anualmente, como China y Estados Unidos de América (E.U.A.). Debido a la globalización se aprecia también que prácticamente todos los países contribuyen en la generación global de estos residuos.

Se realizó la siguiente tabla 3.3 a partir del conjunto de datos, separándolos por continente, de manera que sea más sencillo analizar la información correspondiente a cada uno.

Tabla 3.3. RAEE generados por continente en 2019.

Región	RAEE totales generados (kt)	RAEE totales generados (kg/hab.)	Población total (millones)
Asia	26,527.30	9.40	4,589.06
América	13,120.50	9.57	984.48
Europa	10,382.10	15.21	596.11
África	2,905.00	2.85	1,148.42
Oceanía	666.80	5.82	41.20
<b>Total</b>	<b>53,601.70</b>	<b>8.67</b>	<b>7,359.27</b>

(Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

A partir de la tabla 3.3 se realizaron las gráficas de las figuras 3.7 y 3.8. La primera graficando los RAEE generados anualmente por continente y la segunda los RAEE producidos por habitante al año.

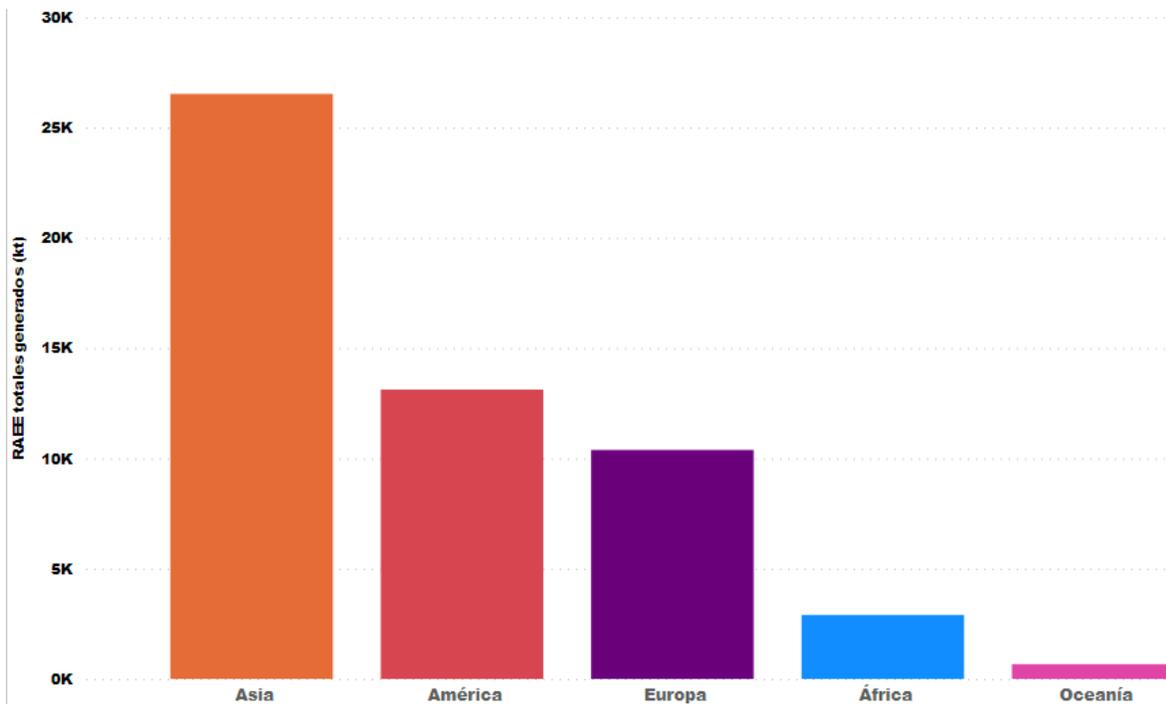


Figura 3.7. RAEE generados por continente en 2019, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

En la figura 3.7 se puede notar que Asia es el mayor generador de RAEE, lo cual puede atribuirse a que tiene una población más grande que los demás continentes, por otro lado, en América y Europa es posible deducir que el nivel de industrialización y urbanización de sus países provoca que generen una gran cantidad de RAEE en comparación a África y Oceanía.

En la figura 3.8 se puede observar que en Europa los habitantes son los que más RAEE generan a nivel mundial, lo cual demuestra que entre más desarrollado esté un país, sus habitantes tienden a consumir una mayor cantidad de AEE, aunque no tenga tanta población como Asia.

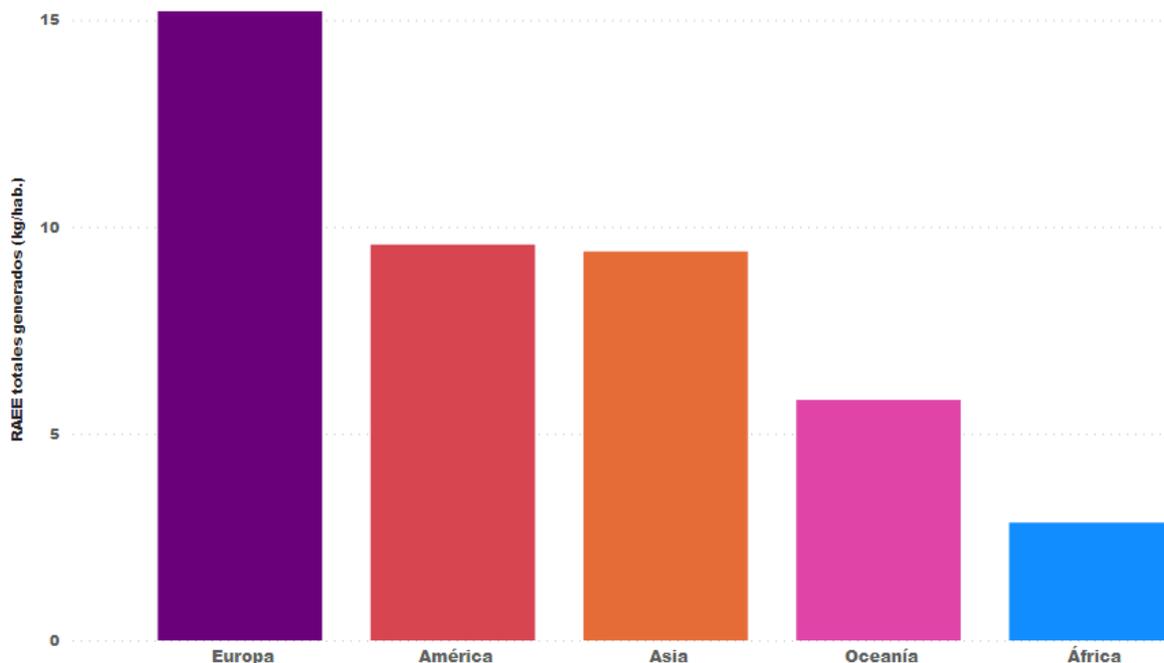


Figura 3.8. RAEE generados por habitante por continente en 2019, (Elaboración propia, 2021).  
Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

Se debe considerar también la población de cada continente, en la gráfica de la figura 3.9 se puede reafirmar que África tiene una mayor población que América y Europa, pero al no estar industrializada sus habitantes no generan muchos RAEE.

POBLACIÓN TOTAL (MILLONES) POR REGIÓN

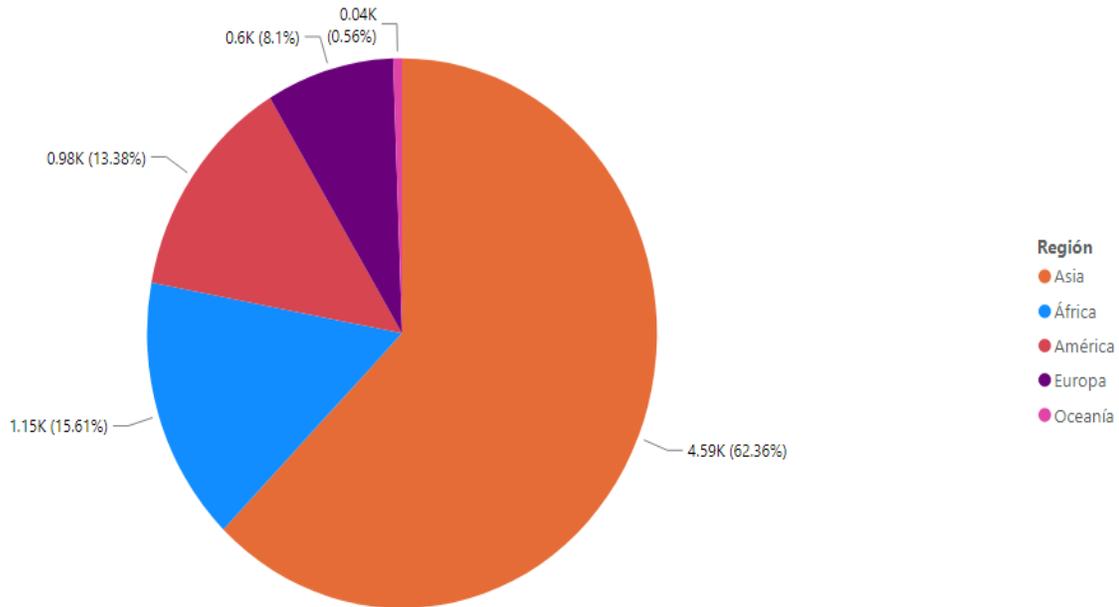


Figura 3.9. Población por continente, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

Además, se realizó la tabla 3.4, para comparar la cantidad de RAEE generados contra la cantidad de RAEE recogidos y reciclados oficialmente por continente en 2019.

Tabla 3.4. RAEE generados y reciclados por continente en 2019.

Región	RAEE totales generados (kt)	RAEE recogidos y reciclados oficialmente (kt)
África	2,905.00	21.01
América	13,120.50	1,179.89
Asia	26,527.30	2,722.60
Europa	10,382.10	4,881.10
Oceanía	666.80	58.00
<b>Total</b>	<b>53,601.70</b>	<b>8,862.60</b>

(Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

De la tabla 3.4 se realizó la gráfica de la figura 3.10, donde se puede concluir que Europa lleva la delantera en el reciclaje de RAEE con 55.08%, después Asia con 30.72%, mientras que América solo un 13.31%. Sin embargo, esto no es suficiente, ya que Europa genera más de 10 millones de toneladas métricas al año, y aun siendo la que más recicla, sólo es aproximadamente el 40%. Además, de los 53,600 kt métricas generadas en 2019 mundialmente, sólo el 16% aproximadamente fue reciclado.

Por lo que existe una gran ventana de oportunidad para reciclar y aprovechar estas materias primas, implementando minería electrónica y leyes o normativas que ayuden a gestionar estos residuos, especialmente en los países más desarrollados.

**RAEE Recogidos y Reciclados Oficialmente (kt) por Región**

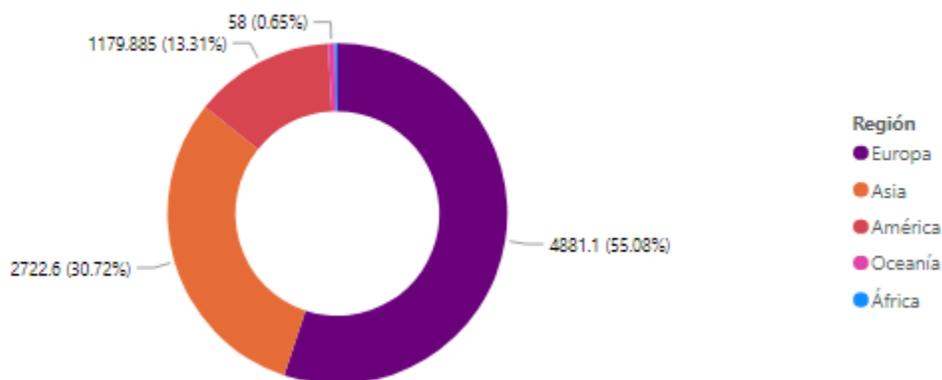


Figura 3.10. RAEE recogidos y reciclados por continente, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

Es posible concluir que, en 2019, el mundo generó 53.6 millones de toneladas métricas (Mt), de los cuales solo el 16.1% quedó oficialmente documentado como recogido y reciclado de forma adecuada. Aunque estas cifras traducen un incremento de 1,8 Mt desde 2014, el total de RAEE generados a nivel mundial aumentó en 9.2 Mt, lo que indica que las actividades de reciclaje no siguen el ritmo de crecimiento global de los RAEE.

Una vez analizado el conjunto de datos, se aplicó el método del codo (método que ayuda a decidir en cuántos K grupos dividir el conjunto de datos) donde se obtuvo que es conveniente elegir 4 grupos para el conjunto de datos utilizado, el método generó la gráfica de la figura 3.11.

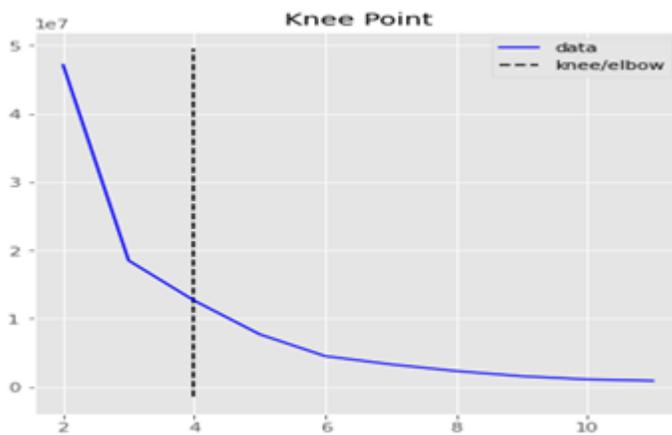


Figura 3.11. Método del codo, (Elaboración propia, 2021)

Con el número k de grupos decidido se aplicó el algoritmo K-means a los datos, etiquetando y agrupándolos, dando como resultado la tabla de la figura 3.5, donde se puede observar que se generaron 4 grupos. El grupo 1 conformado por 168 países, el grupo 2 por 1 país, el grupo 3 por 10 países y el grupo 4 por 1 país.

Tabla 3.5. Resultados del algoritmo K.means de RAEE generados por 180 países.

Cluster	Países del cluster	RAEE generados (kt)	RAEE generados (kg/hab.)	RAEE recogidos y reciclados oficialmente (kt)	Población (millones)
1	168	110.20	8.28	16.38	18.63
2	1	10,129.00	7.20	1,546.00	1,406.81
3	10	1,804.10	14.19	354.51	249.25
4	1	6,918.00	21.00	1,020.00	329.43

(Elaboración propia, 2021)

Con los datos de la anterior tabla 3.5 se realizaron las siguientes gráficas de las figuras 3.12, 3.13, 3.14 y 3.15, para poder analizar de mejor manera los datos obtenidos. De los cuales los clusters 2 y 4 pertenecen a los mayores generadores, donde el cluster 2 que representa a China genera 10,129 kt de RAEE, el cluster 4 a E.U.A que genera 6,918 kt métricas de RAEE, seguido del cluster 3 que representan los 10 países que más generan después de China y E.U.A, con un promedio de 1,804 kt por país, entre ellos México, Francia e India. Por último, el cluster 1, conformado por 168 países, muestra que en promedio cada uno de estos países generan sólo 110 kt métricas de RAEE.

A continuación, en las figuras 3.12, 3.13 y 3.14 se representa los RAEE generados (kt) por cluster, los RAEE generados por kilogramo por habitante, y población por cluster. Se observa que la cantidad de RAEE generados en promedio por cluster es proporcional a la población promedio de este.

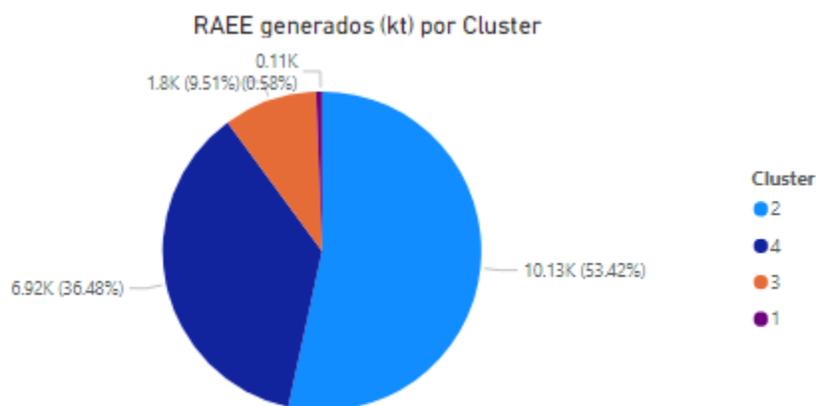


Figura 3.12. RAEE generados por grupo, (Elaboración propia, 2021)

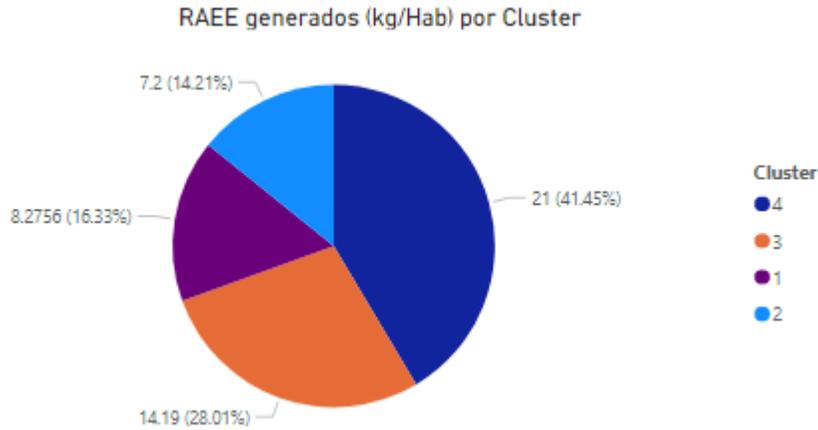


Figura 3.13. RAEE generados por habitante por grupo, (Elaboración propia, 2021)

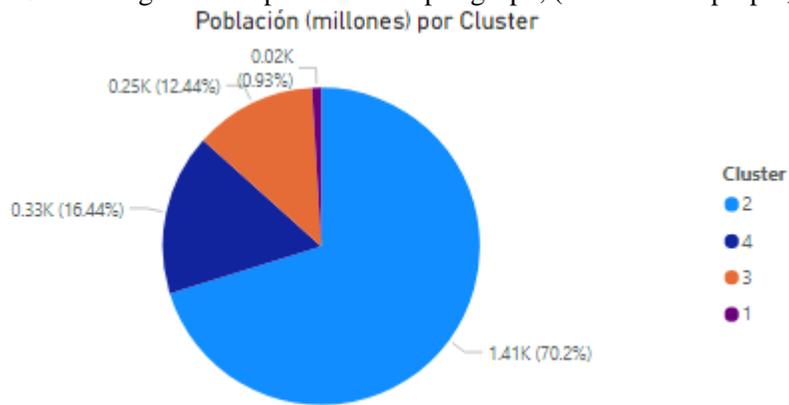


Figura 3.14. Población por grupo, (Elaboración propia, 2021)

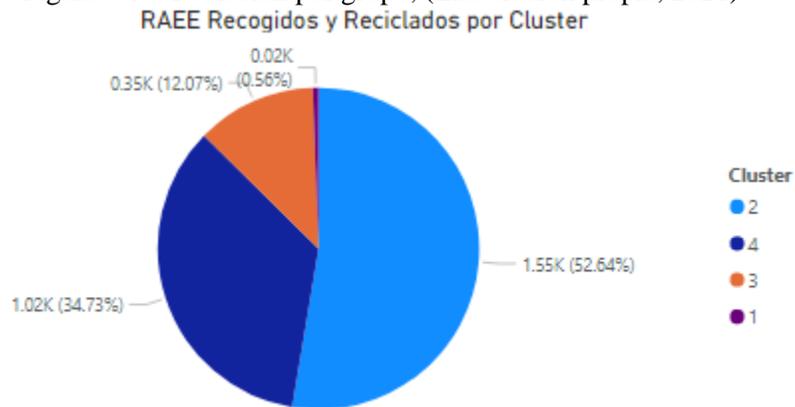


Figura 3.15. RAEE recogidos y reciclados por grupo, (Elaboración propia, 2021)

De la figura 3.15 se concluye que el cluster 2 es el que más RAEE recicla, mientras que el 1 es el que menos, siendo que este último contiene una gran cantidad de países, lo que refleja que la mayoría de los países no han enfocado esfuerzos en el reciclaje de estos residuos o de un correcto tratamiento.

### 3.1.4 Agrupamiento K-Means de los países que más generan RAEE

Con los datos registrados por el observatorio mundial de los residuos electrónicos 2017 y 2020 sobre la generación de RAEE en 2016 y 2019 se implementó el algoritmo k-means sobre los 15 países que más generan estos residuos en esos años, para obtener una mejor comprensión de los datos y así lograr analizarlos agrupándolos en grupos con características similares (Baldé et al., 2020).

Antes de implementar el algoritmo K-means se analizó el conjunto de datos disponible, tabla 3.3. para conocer de mejor manera la información disponible.

Tabla 3.3. Los 15 países que más RAEE generan.

País	RAEE generados (Kt) (2016)	RAEE generados (Kt) (2019)	RAEE generados (kg/hab.) (2016)	RAEE generados (kg/hab.) (2019)	Población (millones)
China	7200	10129	5.20	7.20	1,406.81
Estados Unidos	6300	6918	19.40	21.00	329.43
India	2000	3230	1.50	2.40	1,345.83
Japón	2100	2569	16.90	20.40	125.93
Brasil	1500	2143	7.40	10.20	210.10
Rusia	1400	1631	10.70	11.30	144.34
Indonesia	1500	1618	4.90	6.10	265.25
Alemania	1900	1607	22.80	19.40	82.84
Reino Unido	1600	1598	24.90	23.90	66.86
Francia	1400	1362	21.30	21.00	64.86
México	1106	1220	8.20	9.70	125.77
Italia	1200	1063	18.90	17.50	60.74
España	900	888	20.10	19.00	46.74
Turquía	800	847	10.00	10.20	83.04
Corea del sur	789	818	15.00	15.80	51.77
<b>Total</b>	<b>31695</b>	<b>37641</b>	<b>207.20</b>	<b>215.10</b>	<b>4,410.30</b>

(Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2017 y 2020).

Con los datos de la tabla 3.6 se generaron los gráficos de las figuras 3.16, 3.17, y 3.18 para comprender mejor el conjunto de datos.

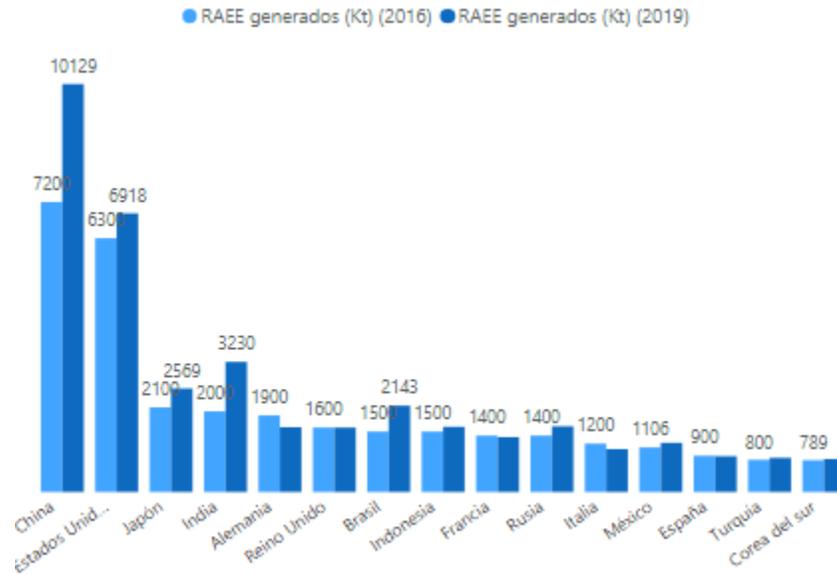


Figura 3.16. RAEE generados en 2016 y 2019 por los países que más RAEE generan, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2017 y 2020).

De la figura 3.16 se puede notar que de 2016 a 2019 existieron crecimientos grandes como en China, India y Brasil, mientras que otros países fue un aumento lineal, como en E.U.A., Japón y México. En otros hubo disminución de su generación, Alemania, Italia, Francia, esto se le puede atribuir a que los países europeos llevan el liderazgo en reciclaje y leyes para el correcto tratamiento de RAEE.

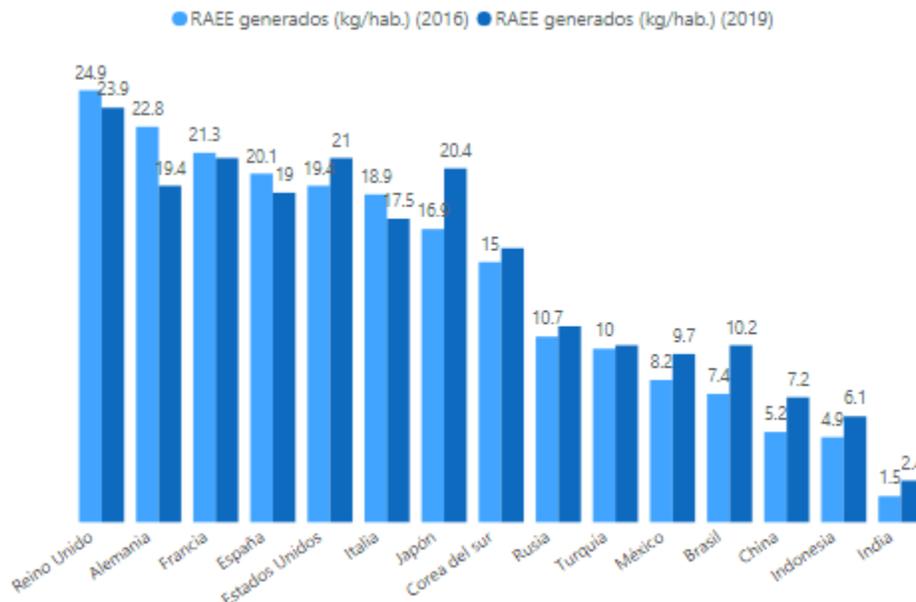


Figura 3.17. RAEE generados en 2016 y 2019 por habitante por los países que más RAEE generan, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2017 y 2020).

Se puede observar en la gráfica de la figura 3.17 que en todos los países europeos disminuyó la generación de RAEE por habitante de 2016 a 2019, lo que hace notar que es efectivo implementar medidas y normativas para el correcto tratamiento de los RAEE. Ya que en E.U.A., Japón, Brasil, China o México, donde aún no han implementado medidas importantes ha continuado un aumento en la generación de estos residuos.

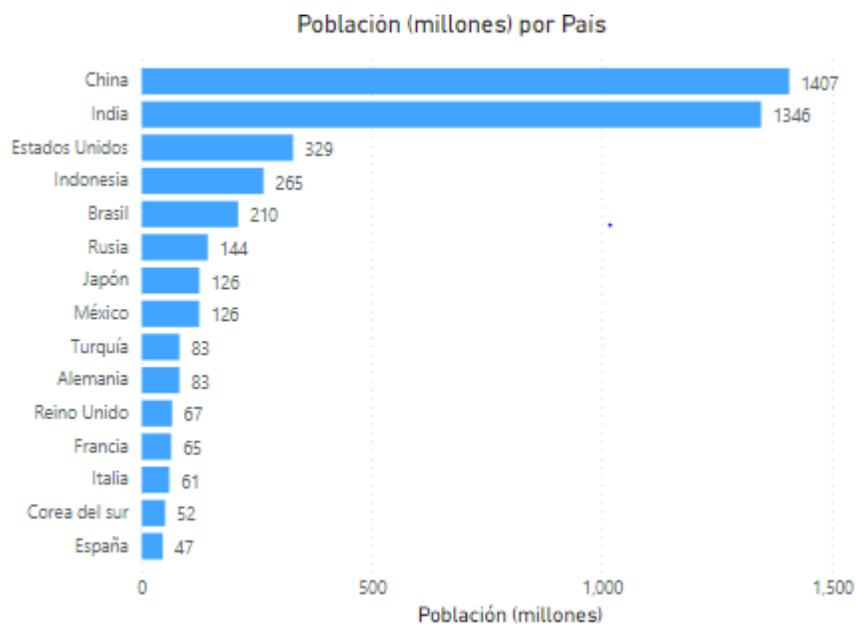


Figura 3.18. Población de los países que más RAEE generan, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2017 y 2020).

Es importante considerar la población de estos 15 países, por lo cual en la figura 3.18 se puede notar que China, India y E.U.A son los países con mayor población, donde se puede ver la diferencia entre China, que es un país muy desarrollado y por tanto genera muchos RAEE, en comparación con India que tiene una población similar y al no estar tan desarrollado no genera tanto, que incluso E.U.A genera más RAEE con menor población, pero mayor urbanización e industrialización.

Una vez analizado el conjunto de datos, se aplicó el método del codo donde se obtuvo que es conveniente elegir 5 grupos para el conjunto de datos utilizado, el método generó la gráfica de la figura 3.19.

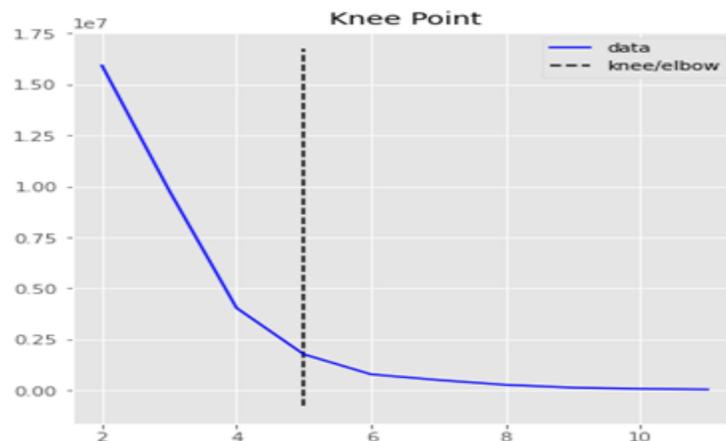


Figura 3.19. Método del codo, (Elaboración propia, 2021)

Decidido el número k de grupos se aplicó el algoritmo K-means a los datos, etiquetando y agrupándolos, dando como resultado la tabla de la figura 3.7, donde se puede observar que se generaron 5 grupos. El grupo 1 conformado por 5 países, el grupo 2 por 1 país, el grupo 3 por 1 país, el grupo 4 por 2 países y el grupo 5 por 6 países.

Tabla 3.7. Resultados del algoritmo K-means de los países que más RAEE generan.

Cluster	Países del cluster	RAEE generados (Kt) (2016)	RAEE generados (Kt) (2019)	RAEE generados (kg/hab.) (2016)	RAEE generados (kg/hab.) (2019)	Población (millones)
1	5	959	967.20	14.44	14.44	73.61
2	1	7200	10,129.00	5.20	7.20	1,406.81
3	1	6300	6,918.00	19.40	21.00	329.43
4	2	2050	2,899.50	9.20	11.40	735.88
5	6	1550	1,659.83	15.33	15.32	139.04

(Elaboración propia, 2021)

Con los datos de la anterior tabla se realizaron las siguientes gráficas de las figuras 3.20, 3.21, 3.22, 3.23 y 3.24, para poder analizar de mejor forma los datos obtenidos. El cluster 1 se conforma por 5 países, México, Italia, España, Turquía y Corea del sur que son los que menos generan en proporción con 959 kt y 967.20 kt en promedio para 2016 y 2019 respectivamente. El cluster 2 por China, que es el que más genera con 72,000 kt y 10,129 kt, el cluster 3 por E.U.A en segundo lugar con 6,300 kt. y 6,918 kt, el cluster 4 por India y Japón que están en tercer lugar produciendo 2050 kt y 2899 kt, finalmente el cluster 5 por Brasil, Rusia, Indonesia, Alemania, Reino Unido y Francia que producen en promedio 1550 kt y 1659 kt.

En la figura 3.20 y 3.21 se puede notar que la generación de RAEE por cluster continuó con el crecimiento esperado de 2016 a 2019. Así como en la figura 3.22 y 3.23 se mantuvo casi en los mismos porcentajes de generación de RAEE por habitante de 2016 a 2019 por cluster. Finalmente, en la figura 3.23 se aprecia que el cluster 2 y 4 son los de mayor población, pero el cluster 2 es el que más RAEE genera con el 39.87% mientras que el 4 sólo un 11.35%.

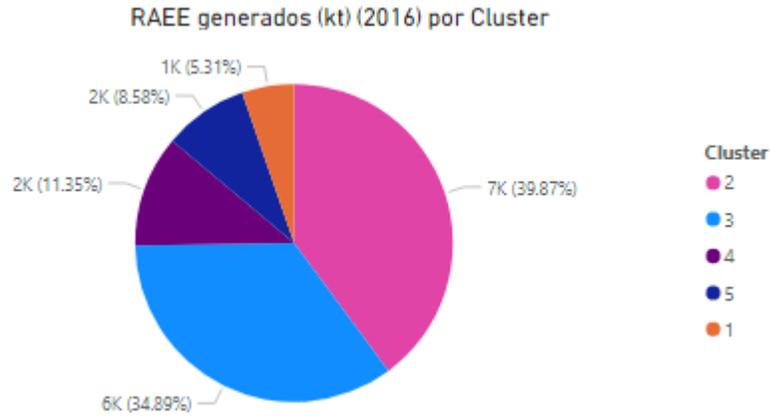


Figura 3.20. RAEE generados 2016 por grupo, (Elaboración propia, 2021)

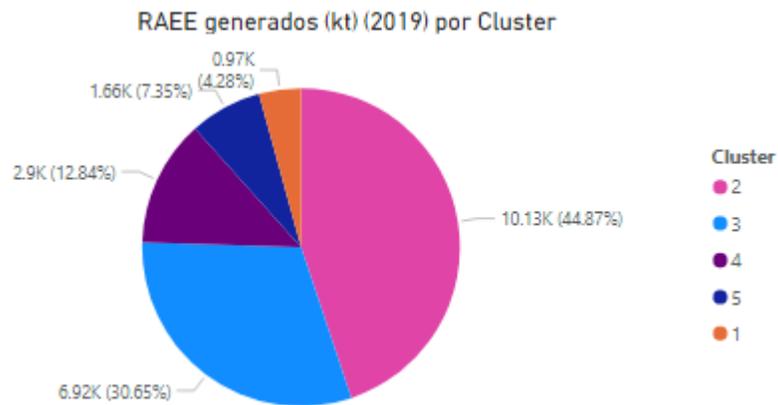


Figura 3.21. RAEE generados 2019 por grupo, (Elaboración propia, 2021)

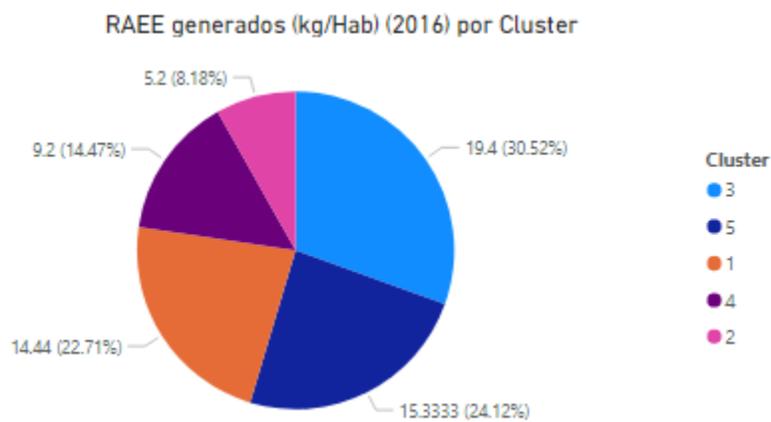


Figura 3.22. RAEE generados por habitante 2016 por grupo, (Elaboración propia, 2021)

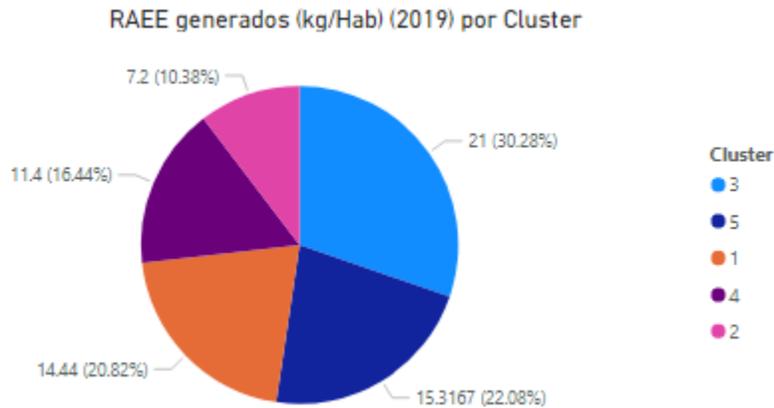


Figura 3.23. RAEE generados por habitante 2019 por grupo, (Elaboración propia, 2021)

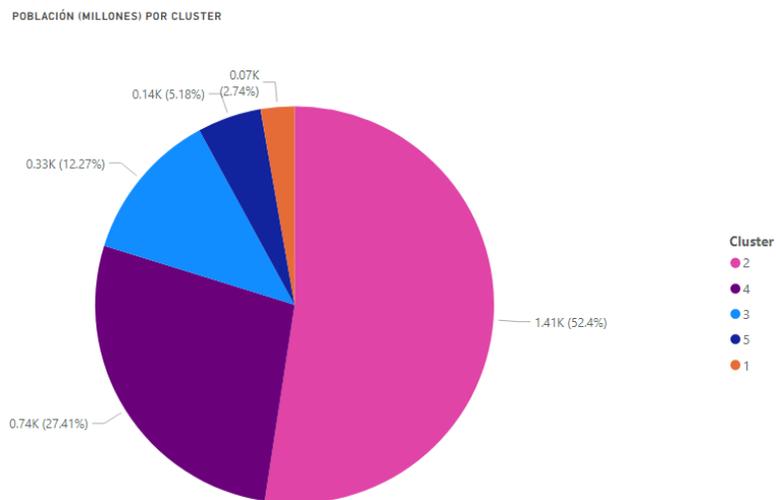


Figura 2.24. Población por grupo, (Elaboración propia, 2021)

### 3.1.5 Comparación de países con y sin legislación en el reciclaje de los RAEE

#### ➤ Europa

En la UE existe una infraestructura de gestión de residuos electrónicos muy bien desarrollada y respetuosa con las normas en vigor para la recolección de estos residuos en comercios y municipios por operadores privados. También para la recuperación de componentes reciclables de RAEE recogidos y eliminados conforme a las normas vigentes y respetando al ambiente. Esto se ha conseguido gracias a la historia relativamente larga de leyes sobre residuos electrónicos en la UE que comenzó a principios de 2003. Así, los datos estadísticos muestran que el 59% de los residuos electrónicos generados en Europa Septentrional y el 54% de los generados en Europa Occidental se documentan cómo reciclados oficialmente en 2017, estos son los porcentajes más altos del mundo (Baldé et al., 2020).

Tabla 3.8. Situación de los RAEE en Europa 2019.

Región	RAEE totales generados (kt)	RAEE totales generados (kg/hab.)	Población total (millones)
Asia	26,527.30	9.40	4,589.06
América	13,120.50	9.57	984.48
<b>Europa</b>	<b>10,382.10</b>	<b>15.21</b>	<b>596.11</b>
África	2,905.00	2.85	1,148.42
Oceanía	666.80	5.82	41.20
<b>Total</b>	<b>53,601.70</b>	<b>8.67</b>	<b>7,359.27</b>

(Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).



Figura 3.25. RAEE generados en Europa 2019, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

De la tabla 3.8 y figura 3.25, obtenidas del análisis de datos realizado al inicio del capítulo, se tiene que en Europa en 2019 se generaron 10 Mt y 15.21 kg per cápita de RAEE aproximadamente, teniendo una población aproximada de 596 millones, siendo el tercer continente que más RAEE genera, así como se puede notar que sus habitantes son los que más kg per cápita producen, sin embargo, como se observó anteriormente, en Europa es dónde más RAEE son tratados y reciclados en el mundo. No obstante, es notable que no es suficiente y que se debe generar una mayor conciencia social a sus habitantes sobre la importancia de tener un mejor uso de los AEE que consumen.

➤ Asia

De la tabla 3.9 y figura 3.26, obtenidas del análisis de datos realizado anteriormente, se tiene que en Asia en 2019 se generaron 26 Mt y 9.40 kg per cápita de RAEE aproximadamente, teniendo una población aproximada de 4,500 millones. Esto muestra que es el continente que más RAEE genera en el mundo, pero también es el más poblado.

Tabla 3.9. Situación de RAEE en Asia 2019.

Región	RAEE totales generados (kt)	RAEE totales generados (kg/hab.)	Población total (millones)
Asia	26,527.30	9.40	4,589.06
América	13,120.50	9.57	984.48
Europa	10,382.10	15.21	596.11
África	2,905.00	2.85	1,148.42
Oceanía	666.80	5.82	41.20
Total	53,601.70	8.67	7,359.27

(Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).



Figura 3.26. RAEE generados en Asia 2019, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

➤ África:

De la tabla 3.10 y figura 3.27, obtenidas del análisis de datos realizado al inicio del capítulo, se tiene que en África en 2019 se generaron 2.9 Mt y 2.85 kg per cápita de RAEE, teniendo una población aproximada de 1,150 millones, siendo este continente el segundo que menos de estos residuos genera, aún con una población mayor que Europa y América.

Tabla 3.10. Situación de los RAEE en África 2019

Región	RAEE totales generados (kt)	RAEE totales generados (kg/hab.)	Población total (millones)
Asia	26,527.30	9.40	4,589.06
América	13,120.50	9.57	984.48
Europa	10,382.10	15.21	596.11
<b>África</b>	<b>2,905.00</b>	<b>2.85</b>	<b>1,148.42</b>
Oceanía	666.80	5.82	41.20
<b>Total</b>	<b>53,601.70</b>	<b>8.67</b>	<b>7,359.27</b>

(Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).



Figura 3.27. RAEE generados en África 2019, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

➤ Oceanía:

En Oceanía, únicamente Australia planificó un plan nacional de reciclaje de televisión e informática (National Television and Computer Recycling Scheme, NTCRS) en el marco de la ley de administración de productos del Gobierno del país de 2011 (Product Stewardship Act 2011). Esta ley entró en vigor el 8 de agosto de 2011, y en virtud de ella, también entró en vigor el 8 de noviembre de 2011 la Product Stewardship Act 2011. Debido a este reglamento se brinda a los hogares y a las pequeñas empresas australianas acceso a servicios de recolección y reciclaje de televisores y computadoras financiados por los sectores de esos productos. (Baldé et al., 2020).

➤ América

De la tabla 3.11 y la figura 3.28, obtenidas del análisis de datos realizado anteriormente, se tiene que en América en 2019 se generaron 13,129 Mt y 9.57 kg per cápita de RAEE, teniendo una población aproximada de 984 millones. Siendo el segundo continente que más RAEE genera.

Tabla 3.11. Situación de los RAEE en América 2019.

Región	RAEE totales generados (kt)	RAEE totales generados (kg/hab.)	Población total (millones)
Asia	26,527.30	9.40	4,589.06
<b>América</b>	<b>13,120.50</b>	<b>9.57</b>	<b>984.48</b>
Europa	10,382.10	15.21	596.11
África	2,905.00	2.85	1,148.42
Oceanía	666.80	5.82	41.20
<b>Total</b>	<b>53,601.70</b>	<b>8.67</b>	<b>7,359.27</b>

(Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).



Figura 3.28. RAEE generados en América 2019, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

Lo anterior pone de evidencia un problema general observable en toda América, ya que la falta de armonización en las regulaciones y en los principios generales en los que se basan no es adecuada.

La mayoría de ellas presentan diferencias en el planteamiento general (responsabilidad ampliada del productor, responsabilidad compartida o programas del sector público), en el nivel de jurisdicción (federal, estatal o municipal), en las definiciones de los principios fundamentales, en las partes interesadas participantes, en la asignación de funciones cometidos, y en las categorías de residuos electrónicos aplicables, entre otras (Baldé et al., 2020).

En resumen, de lo visto en este subtema, son varios los países que ya han implementado leyes o normativas para un correcto tratamiento de los RAEE, como se observa en la tabla 3.12, en consecuencia, en estos países se ha observado un aumento en el reciclaje y recolección de estos residuos, como en la UE, en la que se puede notar que toda Europa cuenta con alguna legislación y no es coincidencia que sea el continente que más RAEE recicla, figura 3.29.

Tabla 3.12. Países con y sin legislación RAEE 2019.

Región	Países con Legislación/Política	Países sin Legislación/Política
África	13	36
América	10	23
Asia	17	30
Europa	39	
Oceanía	1	11
<b>Total</b>	<b>80</b>	<b>100</b>

(Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

**RAEE Recogidos y Reciclados Oficialmente (kt) por Región**

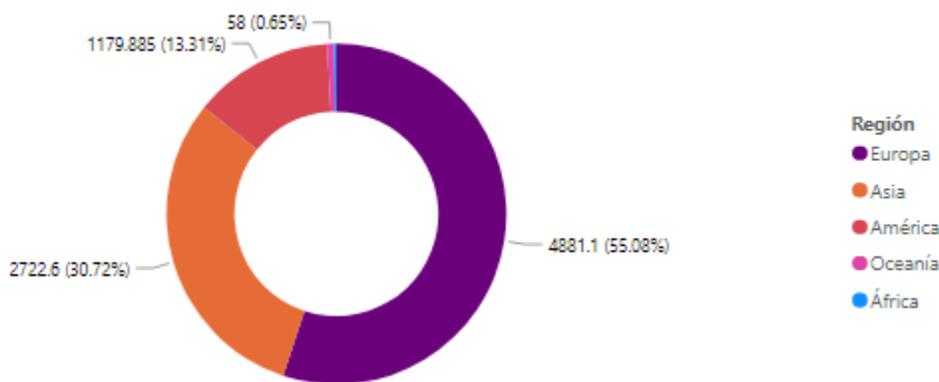


Figura 3.29 RAEE reciclados por continente 2019, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

También se puede observar en las figuras 3.30 y 3.31 los países que cuentan con alguna legislación y política en vigor y los países que no.

Notando que en Asia, África y Oceanía es donde más países no cuentan con alguna reglamentación, lo cual significa que aún falta mucho por hacer, ya que incluso en los países que ya están más avanzados en materia del correcto tratamiento de los RAEE aún es insuficiente.



Figura 3.30. Países con reglamentación sobre RAEE, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).



Figura 3.31. Países sin reglamentación sobre RAEE, (Elaboración propia, 2021). Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

### ***3.2 Propuesta de las normativas de los RAEE***

Una vez expuestas las bases que tiene México es posible proponer las mejoras que se podrían implementar en el país, a partir de lo que otros países líderes en este sector han implementado.

Primero es necesario adoptar una clasificación para los diferentes tipos de RAEE que son posibles encontrar en el país, de manera que se facilite su separación, siendo posible implementar algo similar a la Unión Europea que clasifica en su directiva 2012 en 6 categorías a los RAEE, como se abordó en el capítulo II en el subtema Marco legal internacional.

Además, Alemania detectó la necesidad de implementar centros de disposición a lo largo del país y ha logrado instalar una infraestructura eficiente con 1600 puntos de recolección para reciclar los RAEE, por en ello en México se podría empezar a instalar algunos centros de disposición en algunos puntos estratégicos, iniciando en la capital y posteriormente en los estados, promoviendo el reciclaje de los RAEE; estos son de gran importancia porque dan una forma en la que es posible recolectar los residuos, impulsando el reciclaje de estos y posteriormente una conciencia social de la necesidad de esto.

Hablando de normatividades, se podría incentivar a las diferentes empresas con alguna ayuda económica de parte del gobierno obtenida a través de un impuesto en los AEE, para que contribuyan al desarrollo de la infraestructura, como lo ha aplicado California. Paralelamente multar a los fabricantes que no cumplan con las normativas como podrá ser el no recibir los AEE provenientes de ellos, entre más medidas que fuercen el cambio en estas empresas sean nacionales o extranjeras.

En las normativas del manejo de residuos peligrosos vistas en el capítulo II, la NOM 160 de SEMARNAT establece los elementos y procedimientos para formular los planes de manejo de residuos peligrosos. Esta debe ser ampliada para satisfacer las necesidades antes mencionadas o preferentemente crear una norma específica que solo trate a los RAEE ya que es un residuo que abarca muchos ámbitos.

## **Capítulo IV Propuesta del Plan de Manejo Integral de los RAEE**

---

## **4. Capítulo IV Propuesta del Plan de Manejo Integral de los RAEE**

Tomando como base la información analizada en el capítulo anterior, es relevante tomar en cuenta que no es buena estrategia tratar de implementar de la misma manera los sistemas de recolección, las legislaciones y procesos de los países líderes en estos campos, como los europeos, con México. A pesar de esto es posible trazar un camino a seguir, considerando las diferencias que existen, como son los distintos niveles culturales, socioeconómicos, de urbanización e infraestructura, así como la tecnología aplicada en los procesos, entre otros.

Por lo que en esta propuesta se hace uso de la logística inversa para realizar el proceso de recuperación de los recursos, en este caso, la materia prima valiosa en los RAEE para devolverla a la cadena de producción, así como el correcto desecho de los componentes tóxicos de estos, en México.

### ***4.1 Fases de la propuesta***

A fin de llevar a cabo a la realidad el tratamiento y reciclaje de los RAEE es necesario tener una estrategia clara que pueda ser replicada, la cual se conoce como “Plan de manejo”, este es un instrumento de gestión que ofrece un panorama de los residuos, permitiendo diseñar y controlar su eficiente manejo, minimizando la contaminación que generan y aprovechando el valor de los mismos.

Es de suma importancia tener un plan eficiente para el manejo de los RAEE, debido a los problemas que se han expuesto en capítulos anteriores, integrando los impactos generados, las leyes o normativas, los datos analizados, las estadísticas, patrones de comportamiento, comparativas, entre otros.

Considerando lo anterior se proponen las siguientes etapas del esquema de la figura 4.1, el cual muestra de manera general el procedimiento para el manejo integral y reciclaje de los RAEE, siendo otra forma para realizar la minería electrónica. A continuación, se desarrolla cada etapa.

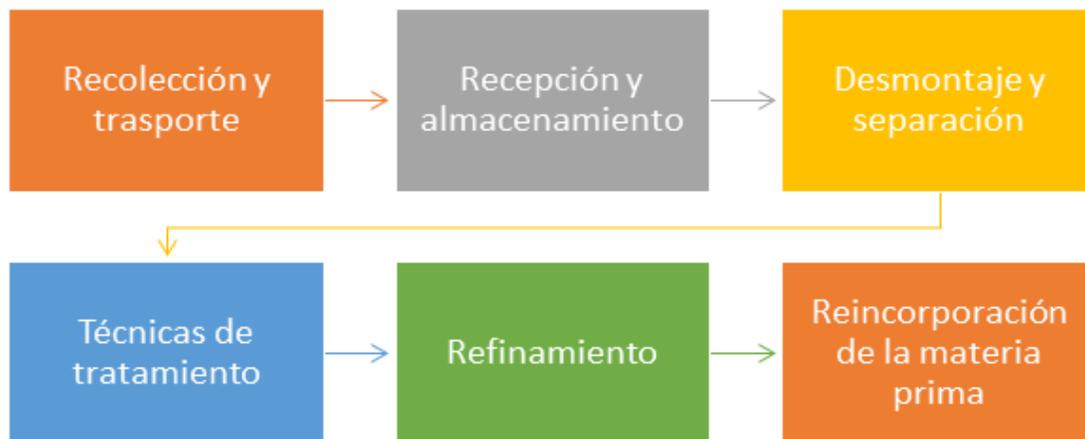


Figura 4.1. Fases del proceso del manejo integral, (Elaboración propia, 2021)

#### ***4.1.1 Proceso de recolección y transporte***

En esta fase se busca captar la mayor cantidad de RAEE en algún centro de recolección, figura 4.2, ubicado en un punto estratégico, para facilitar el transporte de este a una planta de tratamiento. Como esto es un problema que involucra muchos actores como son el gobierno, los consumidores (población) y empresas (productores), se le puede considerar un problema social o suave, por lo que es necesario hacer uso de una metodología que ocupe los sistemas suaves mencionados en el capítulo II, ya que los dueños de los RAEE son personas que desechan estos residuos por distintas razones (obsolescencia).



Figura 4.2. Recolección y transporte, (ulloa S.A., 2020)

Es necesario la creación de lugares de acopio y sistemas de recolección apropiados, de fácil acceso y costos convenientes, porque es el inicio del reciclaje, requiriendo del apoyo y coordinación de los diferentes actores, de manera que se vuelve algo complejo coordinarlos. Por ello se proponen los siguientes seis pasos para un proceso de recolección eficiente, con base en los sistemas suaves, figura 4.3. (Ecoembes, 2020):

- *1. Perfil de la población:*

Mediante un análisis en donde se determine las condiciones sociales, económicas y demográficas de la zona en la que se requiera colocar un centro de acopio, se generará un perfil de la población para determinar los aspectos que rodean al proceso de recolección, como los lugares donde se recolectarán los residuos, la manera de buscar el apoyo de instituciones y autoridades, y así como la forma de promocionar el reciclaje.

- *2. Buscar apoyo de autoridades e instituciones:*

Es necesario obtener los permisos requeridos para poder ingresar y moverse dentro del espacio específico, además de que se lleguen a acuerdos con los participantes para que se realice, ya sea de manera constante o periódica, y que a final se lleguen a acuerdos satisfactorios para todos.

- *3. Identificar las rutas y ubicaciones de centros de acopio:*

Mediante el perfil de población y un análisis logístico, se plantean rutas estratégicas para abarcar los puntos de interés que puedan recolectar la mayor cantidad de AEE. Paralelamente se pretende lograr instalar un centro de acopio eficiente, en donde se requerirá llegar a acuerdos con las autoridades, para tener así una ubicación conveniente en donde haya el mayor alto flujo de personas, facilitando la recepción de los RAEE a través de los habitantes que vivan en esa zona. Además, debe considerarse si es necesario un centro fijo o temporal, en tiempos específicos de manera que sea más factible la recolección de los RAEE y se pueda incentivar el apoyo de los consumidores.

- *4. Promoción de la disposición de RAEE:*

Se requiere hacer una campaña publicitaria para normalizar la disposición de estos residuos logrando concientizar de la necesidad de reciclar, así como implementar alguna estrategia que incentive a los consumidores a llevar sus RAEE al centro de acopio.

- *5. Recepción, separación y conteo de los RAEE:*

Es importante proporcionar una buena atención a las personas para que en futuras ocasiones regresen. Una vez recibidos los RAEE es necesario separarlos dependiendo de una clasificación establecida, como la mencionada anteriormente en el capítulo II, de manera que se puedan contabilizar y empaquetar para ponerlos a disposición del transporte al lugar donde serán reciclados.

- *6. Transporte al almacén primario:*

Una vez teniendo los RAEE separados y contabilizados deben ser bien empaquetados y puestos a disposición para el transporte de estos al almacén primario, donde en un futuro serán tratados.



Figura 4.3. Proceso de recolección, (Elaboración propia, 2021)

#### ***4.1.2 Proceso de recepción y almacenamiento***

Los RAEE recuperados son entregados al almacén primario de una planta de tratamiento, donde son almacenados para su futuro manejo. Figura 4.4.



Figura 4.4. Recepción y almacenamiento, (Luis, H., 2017)

Se debe tomar en cuenta que junto con estos RAEE pueden existir aparatos aún funcionales o sus componentes (como las memorias RAM de las computadoras y discos duros), por lo cual estos deben ser revisados por un grupo de gente capacitada para dar un aval de esto, realizando pruebas básicas de funcionamiento y así se les buscará regresar al ciclo productivo

revendiendo los AEE usados. Se buscará principalmente AEE de empresas que desean actualizarse, pero dispensan aparatos funcionales, que un grupo de personas puede aprovechar.

Para un correcto almacenamiento de estos residuos es conveniente depositarlos en zonas específicas dependiendo del estado o su nivel de peligrosidad del residuo, de manera que es necesario cumplir con las características incluidas en los artículos 15, 16 y 17 del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en materia de residuos peligrosos, donde se retienen temporalmente residuos en tanto se procesan para su aprovechamiento, se entregan al servicio de recolección o se dispone de ellos. Todos aquellos residuos, en cualquier estado físico que, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables y biológico infecciosas (CRETIB), como lo visto en el capítulo II, representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente. (SEMARNAT, 2015).

#### ***4.1.3 Proceso de desmontaje y separación***

Habiéndose clasificado dependiendo de la categoría, como fue visto en capítulo II, se busca aplicar ingeniería inversa sencilla para desmontar los componentes que componen estos RAEE, como las pantallas, monitores, carcassas, baterías, placas, circuitos, entre otros, y estos separarlos para continuar su reciclado puesto que antes de desmontar, triturar, cortar, prensar, entre otros procesos, es necesario extraer todos los componentes básicos y sustancias que pueden suponer un riesgo ambiental o sanitario.

Se busca desmontar las partes sencillas de forma manual, ya sea el desatornillar o retirar tapas, que no requieran procedimientos más complejos, como la disolución de ácido o la fundición. De manera que se realiza una última separación de los componentes, como son las tarjetas electrónicas o las carcassas de plástico, por mencionar algunos, para mandarlos a sus respectivos procedimientos de reciclaje. Figura 4.5.



Figura 4.5. Desmontaje y separación, (tecnologías del reciclaje, 2010)

#### ***4.1.4 Técnicas de tratamiento***

Para esta propuesta del plan de manejo se consideró como el tratamiento a seguir a la técnica de disolución en mezcla ácida debido a su efectividad con metales preciosos de los componentes electrónicos, y la facilidad para replicar y escalar como proceso.

- *Proceso de disolución en mezcla ácida*

El método se centra en la disolución de componentes recubiertos de algún metal precioso como la plata o el oro, sumergiéndolos en una mezcla que puede ser de ácido sulfúrico, ácido nítrico o clorhídrico, figura 4.6. El nivel de extracción de la plata o del oro es del 99%, que son obtenidos de dicha solución.

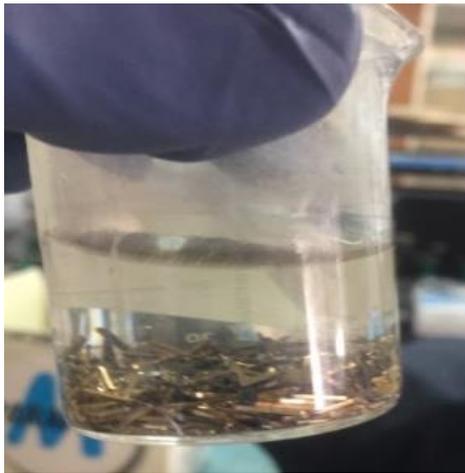


Figura 4.6. Mezcla de ácidos, (Elaboración propia, 2021)

Normalmente la metodología se basa en obtener el material (tarjetas con circuitos electrónicos, pines, etc.) Se procede a realizar la mezcla utilizando los ácidos antes mencionados, a cierta proporción y temperatura, para que se desprenda el metal precioso de estos, de tal forma que este proceso es delicado por su tiempo de reacción ya que varía de la mezcla de ácida. Además, es importante mencionar que se desprenden gases, que deben ser tratados de una manera correcta (Khaliq, A., Akbar, M., 2014). Figura 4.7.



Figura 4.7. Mezcla ácida, (Elaboración propia, 2021)

Una vez aplicada la técnica de tratamiento para completar el reciclaje se debe considerar a los demás materiales sobrantes, aunque tengan un menor valor económico como el plástico, vidrio y metales comunes, figura 4.8, para ser reciclados como mencionamos en el capítulo II subtema 2.5.



Figura 4.8. Metales, (Diario Norte, 2017)

#### ***4.1.5 Proceso de refinamiento***

Los materiales que necesitan un tratamiento último para preparar de manera correcta las materias primas, como el oro reciclado, necesitan un refinamiento como la fundición, figura 4.9, o la extracción en los polímeros. Es necesario aplicar una normativa para que se especifique la calidad de los productos reciclados, de manera que estos puedan ser vendidos a los productores. A continuación, se presenta el método que seguiría después de aplicar el proceso de disolución en mezcla ácida para finalizar la extracción del oro.



Figura 4.9. Refinamiento, (Fundición BIR, 2021)

- *Proceso Piro-metalúrgico*

Este método se basa en la fundición de los metales, aprovechando los diferentes puntos de ebullición de estos calentando y así separando las impurezas de otros residuos como plástico o vidrio que pudiera haber, figura 4.10 (Cui J. & Zhang L., 2008).



Figura 4.10. Procesos pirometalúrgicos, (SN, 2018)

#### ***4.1.6 Reincorporación de la materia prima al ciclo productivo***

Para que sea un tratamiento sustentable y asegurar que pueda funcionar a lo largo del tiempo hay que tomar en cuenta que el proceso de reciclaje de los RAEE implica personal, uso de tecnología y maquinaria especializada que varía para cada aparato, además de los costos para promocionar, recolectar, transportar, almacenar, etc.

Esto para diferentes empresas u organizaciones que se han dedicado a la recolección y tratamiento de los RAEE, al no tener un flujo de dinero constante o incentivo, existe el problema de amortizar los costos que tiene el reciclaje, lo cual obliga en muchos casos a no realizar los tratamientos adecuados, recuperando solo lo que tiene valor y tirando los materiales sin valor y peligrosos.

Sin llegar más allá y generar valor con el reúso no convencional de los aparatos y materiales, lo cual implica invertir en investigación y desarrollo. De esta forma hay que obligar a que se realice un tratamiento completo y desarrollar sistemas para tomar en cuenta todos los residuos.

Una vez terminado todo el proceso de reciclaje, las materias primas como el oro, figura 4.11, obtenidas se pueden regresar a la industria para la fabricación de nuevos productos, de esta manera como se ha mencionado anteriormente se promoverá una economía circular.



Figura 4.11. Venta de la materia prima reciclada, (América Economía, 2018)

La siguiente tabla 4.1 es un ejercicio teórico sobre qué materia prima que se podría encontrar en una tonelada de RAEE ideales; por lo que recabando qué porcentajes tienen los principales RAEE, como los celulares o las computadoras, se desarrollan las principales materias primas, su cantidad y sus rangos de precios aproximados, tomando en cuenta que varían ya que son volátiles.

Tabla 4.1. Precios aproximados de una tonelada de RAEE

<b>Principales materias primas que se pueden reciclar en una tonelada de basura electrónica ideal</b>			
<b>Materia prima</b>	<b>Porcentaje de una tonelada (%)</b>	<b>Precio aproximado de un kg (MXN)</b>	<b>Precio total esperado a obtener (Porcentaje por precio aproximados) (MXN)</b>
<b>Plásticos</b>	30	4.5 - 5.5	1,350 - 1,650
<b>Vidrio</b>	21	0.9 - 1.1	189 - 231
<b>Aluminio</b>	16	19.8 - 24.2	3,168 - 3,872
<b>Hierro</b>	13	4 - 4.9	520 - 637
<b>Cobre</b>	7	68.67-83.6	4,806.9 - 5,852
<b>Plomo</b>	6	16.2 - 19.8	972 - 1,188
<b>Litio</b>	4.8	12.6 - 15.4	604.8 - 739.2
<b>Cobalto</b>	1.2	558 - 682	6,696 - 8,184
<b>Metales más valorados 1%</b>			
<b>Oro (14k)</b>	0.013	700,000	91,000
<b>Níquel</b>	0.085	363.8	309.23
<b>Plata</b>	0.002	16,637.89	1497.41
<b>Total</b>	100%	-	111,083.34 -115,152.84

(Elaboración propia, 2021)

Se puede resaltar que la materia prima reciclada que más valor genera es el oro, esto se aprecia mejor al restar el precio del oro para hacer la sumatoria del total obtenido en la tabla 4.1, se tienen el siguiente precio total esperado a obtener (20,083.34 - 24,152.84 MXN), de manera que sumando el oro se tiene (111,083.34 -115,152.84 MXN) respectivamente. Por lo cual las ganancias de la venta del oro reciclado aproximadamente serían del 95%, mientras que la venta de las demás materias primas sólo representa el 5%. Llegando a la conclusión de que una planta de reciclaje de RAEE es de gran rentabilidad especializarse en la obtención de oro, y es importante denotar que no siempre se puede esperar que se cumpla este valor ya que la tecnología siempre está en un constante cambio.

Además, en un estudio realizado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), se obtuvo que en 2016 de 45 millones de toneladas métricas de RAEE contenían 500 toneladas de oro, lo que equivale al 0.001% de estos desechos, y pese a ser un pequeño porcentaje, este se estimó con un valor de 18.840 millones de euros. Esto se puede comparar con los 12,2 millones de toneladas de plástico con un valor de 3.500 millones. (Statista, 2017).

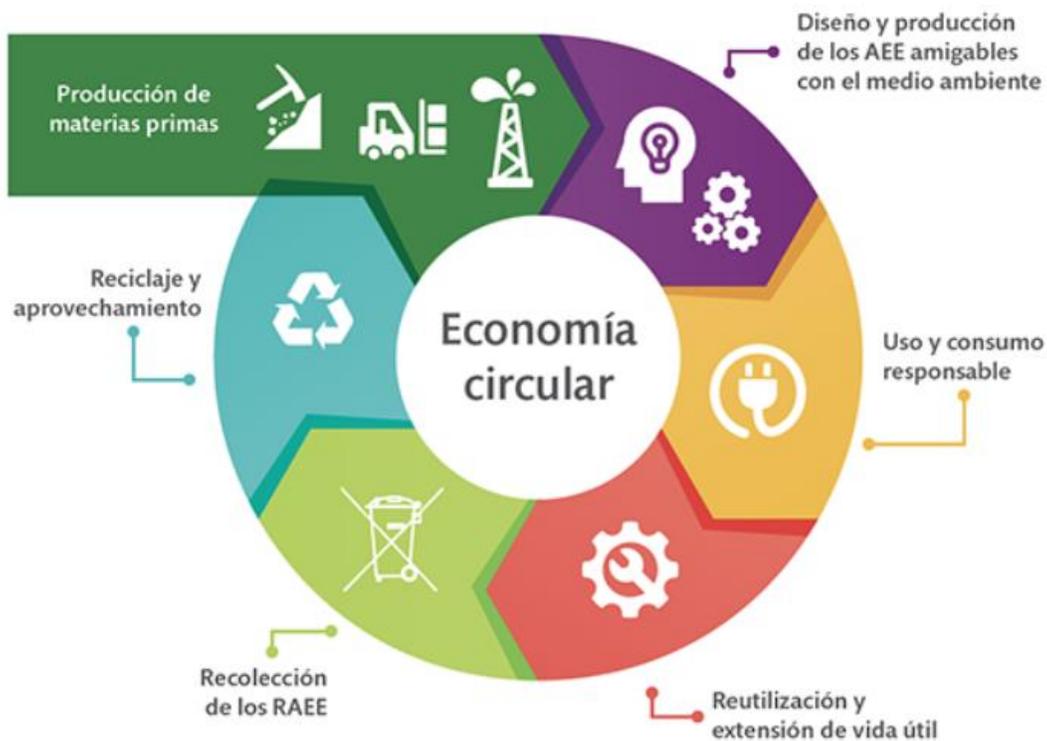


Figura 4.12 Economía circular de los RAEE, (MINAMIENTE, 2017)

## ***4.2 Propuesta para la recuperación de oro***

El objetivo principal de los siguientes experimentos se basa en la recuperación del oro mediante el método de disolución en mezcla ácida. Se utilizaron computadoras en desuso, que fueron recolectadas en distintos puntos, como donaciones propias, de familiares, de instituciones, y principalmente con el apoyo de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Para realizar la experimentación se decidió usar exclusivamente computadoras debido a la facilidad de extracción de los componentes, figura 4.13, y además son una fuente rica para minar el oro.



Figura 4.13. Tarjetas RAM, de video y sonido, (Elaboración propia, 2021)

Para los experimentos se optó por la utilización del método de mezcla ácida, debido a que es el método que utilizan las plantas de tratamiento modernas, además de que se enfoca en “atacar” a los materiales alrededor del oro, sin dañar a este, siendo un proceso lento pero efectivo.

El uso de ácidos representa un claro peligro para los operarios, y es necesario tomar medidas preventivas para la proteger al medio ambiente y evitar accidentes, que conlleva la manipulación de esta.

### ***4.2.1 Análisis de las muestras***

Para poder realizar un análisis de las muestras que sea representativo y cuantificar los resultados, primero se realizó la tarea de recolectar 10PCs, figura 4.14, de uso común de oficina, escolar o que se podría encontrar en los hogares de una familia promedio.



Figura 4.14. Gabinetes, (Elaboración propia, 2021)

Una vez recolectadas las computadoras necesarias, se desmontaron los componentes utilizando herramienta especializada, como los alicates para cortar los pines, una tijera que pudiera romper las tarjetas, un caudín para extraer con calor los pines y destornilladores de diferentes cabezas y extensiones. Subsecuentemente se busca obtener la mayor cantidad de pines (recubiertos de oro), recortar las tarjetas en las partes donde se encuentra el oro, así como juntar los procesadores, figura 4.15 y 4.16.



Figura 4.15. Herramienta y procesadores, (Elaboración propia, 2021)



Figura 4.16. Pines desmontados, (Elaboración propia, 2021)

Después de desmontar las 10 computadoras se realizó una tabla donde se puede observar la cantidad de pines, procesadores y tarjetas que se obtuvieron, a las cuales es posible llevar a cabo los procesos necesarios para recuperar el oro de esas partes. Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Materiales obtenidos

#	Pines [g]	Procesadores [g]	Tarjetas [g]	Marca
1	2.5	22.26	5.08	Dell
2	3.71	18.83	4.56	Lenovo
3	7.83	20.09	3.36	Dell
4	2.57	33.16	2.47	HP
5	3.3	39.21	2.23	Dell
6	6.72	39.55	1.91	E-machine
7	6.24	38.78	2.16	Dell
8	3.56	22.05	3.81	Dell
9	5.34	18.77	7.81	Microsoft
10	4.21	19.52	3.06	HP
<b>Total</b>	<b>45.98</b>	<b>272.22</b>	<b>36.45</b>	
<b>Promedio</b>	<b>4.598</b>	<b>27.222</b>	<b>3.645</b>	

Nota: Los procesadores fueron pesados aún con la parte metálica.  
(Elaboración propia, 2021)

Se tiene un total de 45.98g de pines (recubiertos de oro), 272.22g de procesadores (aún con su parte metálica), y 36.45g de tiras de tarjetas (en las partes donde se encuentra el oro), de manera que al haber desmontado 10PCs se puede calcular en promedio, por cada computadora, que es posible encontrar 4.598 gramos de pines, 27.22 gramos de procesadores y 3.645 gramos de tarjetas, con ello se puede dar un aproximado de 35.42 gramos de muestra por PC que una vez realizando el método de separación para extraer el oro, se podrá saber qué cantidad de oro se obtiene.

#### 4.2.2 Propuesta de separación por ataque ácido a pines (Mezcla ácida)

Con las muestras obtenidas se procede a realizar el experimento, usando la metodología de la recuperación de oro por medio del ataque de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), ya que este ácido es de fácil obtención, además de que es un método recomendado en diversas literaturas, porque se puede comparar los resultados y tener más información de los rendimientos reales (Cuevas, H. 2013)

Peso de la muestra	46 gramos
Volumen de $\text{HNO}_3$	14ml
Temperatura	180 C°

Datos de sustancias químicas teóricos

Cantidad de sustancia:

- 46g muestra =145 ml de  $\text{HN03}$
- 10g muestra = 32.21 ml de  $\text{HN03}$
- Molaridad
- 15.33M
- A 0.5 M
- Se necesita 4447.7391ml

El material utilizado para realizar la experimentación:

- Dos vasos de precipitado de 250 mililitros. (grandes)
- Pipeta graduada y una perilla.
- Una varilla de vidrio.
- Una parrilla de calentamiento con agitación magnética.
- Agitador magnético
- Papel filtro. (uno bueno)
- Tarjetas de impresión de computadora.
- Pinzas para desmontar los pines de la tarjeta.
- Solución de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) al 64% de pureza.
- Soporte universal
- Balanza
- Pines 46 gramos
- Embudo
- Soporte universal

- Matraz Aforado 1 Litro
- Pipeta Volumétrica 30ml
- Pipeta Graduada 5ml
- Piseta

Proceso de experimentación:

1. Obtener el material de pines y procesadores recortado, tratando de quitar la mayor parte de plástico y otros metales.

2. Poner primero la porción de pines que se quiere someter a la reacción en el vaso precipitado de 250ml y después agregar ácido nítrico de manera periódica, para que la reacción vaya aumentando (evitar verterlo de manera brusca). La cantidad que debe agregarse de ácido nítrico debe ser suficiente para cubrir la porción de pines. Una vez realizado lo anterior, agitar la mezcla con una varilla de vidrio. En este momento, comenzarán a disolverse los metales comunes usados para la alianza con el oro,

3. Calentar la solución en la parrilla de calentamiento a 180°C, colocar un imán para realizar una mezcla por medio de la agitación magnética para favorecer la disolución de los metales. Agregar periódicamente más ácido nítrico (aproximadamente 2 ml de ácido nítrico) cada cuando se esté evaporando o cuando paren los signos de reacción química, que ocurre mientras la aleación se disuelve y provoca burbujas.



Figura 4.17. Vaso sobre calentador magnético, (Elaboración propia, 2021)

4. Cuando la digestión haya terminado, y al agregar más ácido nítrico no reacciona, se dejará que la solución se enfríe apagando la parrilla de calentamiento. El vaso contendrá pequeñas cuentas de oro.
5. Filtrar la mayor parte del ácido posible, después hacer la separación de lo que queda en el vaso. Las partículas de oro quedarán en el papel filtro.
6. Limpiar las hojuelas de oro con agua caliente repetidas veces.

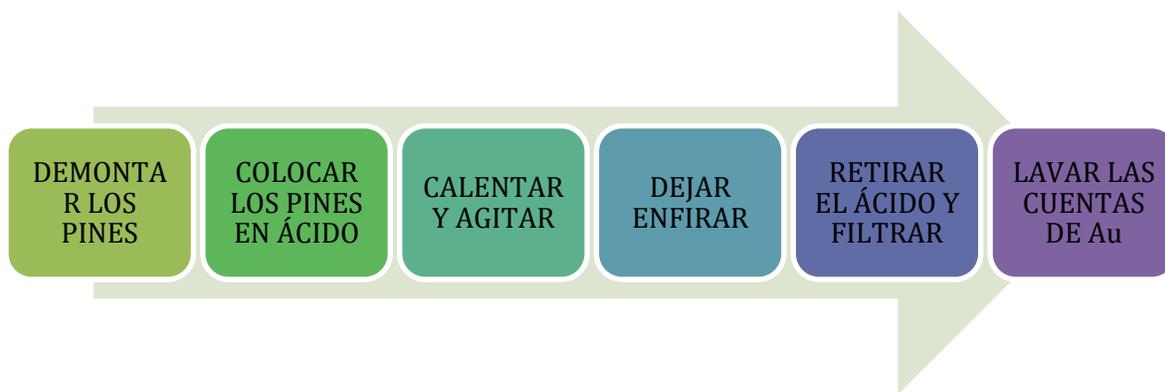


Figura 4.18. Procesos del experimento, (Elaboración propia, 2021)

Nota: durante el proceso se recomienda utilizar una campana de vacío debido a que la reacción química soltará vapores. Para mayor seguridad se debe utilizar bata de laboratorio, guantes y lentes protectores.



Figura 4.19. Oro en papel filtro recuperado, (Elaboración propia, 2021)

Se puede observar el oro obtenido en el papel filtro, figura 4.19, que por razones de la pandemia no fue posible cuantificar el peso en gramos, pero se estima visualmente que es aproximado a un gramo y es congruente con la literatura.

#### ***4.2.3 Propuesta de separación por ataque ácido a tarjetas***

Con las muestras obtenidas figura 4.20., es posible realizar el experimento utilizando ácido clorhídrico (muriático), nítrico y peróxido de hidrógeno. Este experimento es muy utilizado de manera casera por los recolectores clandestinos de RAEE ya que los ácidos son de uso doméstico, además de que no se necesitan recipientes especiales. (2015, Sreetips.).



Figura 4.20. Material de pines de tarjetas, (Elaboración propia, 2021)

#### **Materiales:**

- Cuatro vasos de precipitado 200 ml
- Pipeta de 10ml
- Peróxido de hidrógeno al 34%  $H_2O_2$
- Ácido clorhídrico (muriático), (porcentaje comercial) HCl
- Ácido nítrico (porcentaje comercial)  $HNO_3$
- Bisulfito de sodio
- Stannous chloride test solution (Prueba)
- 30 gr de tarjetas recortadas
- Sistema de burbujas (Soplador y Conexión de plástico) / Agitador magnético
- Atomizador
- 500ml de agua destilada
- Guantes de hule

- Bureta con soporte universal con pinzas para bureta
- Papel filtro
- Cubre bocas.
- Calentador magnético

Proceso de experimentación:

1. Colocar la muestra en el vaso de 200 ml
2. Verter 100 ml de ácido muriático
3. Verter 10 ml de peróxido de hidrógeno
4. Colocar un sistema de aire que produzca burbujas para agitar la muestra
5. Verter en incrementos de 12 hrs, 24 y 72 hrs 10 ml más de peróxido de hidrógeno
6. Al llegar las 72 horas verter el líquido en otro recipiente y con el atomizador quitar los restos de oro.
7. Filtrar el líquido anterior en el papel filtro
8. Los restos del oro serán llevados a limpieza con 20 ml de ácido muriático y ácido nítrico 2 ml
9. Calentar a media temperatura y después verter 20 ml de ácido muriático y 2ml de ácido nítrico
10. Volver a filtrar para quitar los restos de plásticos
11. Después se hará una mezcla de sulfito de sodio para verterlo en los restos
12. Hacer una prueba de (stannous chloride test solution) para determinar el oro en la solución
13. Esperar 4 min para que los metales pesados descendan al fondo del recipiente
14. Verter el ácido nítrico que queda en la parte superior y se realiza otra prueba de (stannous chloride test solution) para determinar el oro en la solución.
15. Se llena el recipiente con el oro con agua caliente y se espera otra vez que se asiente y verter los desechos.
16. Se queda el lodo con oro y se deja secar.
17. Ya seco agregar 40 ml de ácido clorhídrico, agitar y calentar a medio régimen.
18. Esperar a que se enfríe, se asiente y realizar otra prueba de (stannous chloride test solución) para determinar el oro en la solución si sale positiva.
19. Agregar otra porción de sulfito de sodio y realizar otra prueba de (stannous chloride test solution) para determinar el oro en la solución.
20. Desechar la solución y agregar a la muestra agua caliente, esperar a que se asiente hasta obtener la una prueba de (stannous chloride test solution) con la calidad esperada de oro.
21. Calentar con tres mecheros 20 minutos
22. Verter el oro fundido en un molde
23. Enfriar en agua el metal.



Figura 4.21. Tarjetas en mezcla ácida. (sreetips, 2015)

## **Capítulo V Conclusiones y discusión de trabajo futuro**

---

## 5. Capítulo V Conclusiones y discusión de trabajo futuro

### - *Conclusión del objetivo general:*

Se concluyó la importancia de generar un plan específico que logre gestionar correctamente a los RAEE, debido a las problemáticas que conllevan, a la presencia constante actual en México y a el inevitable crecimiento futuro de estos residuos, por lo cual se planteó el manejo que se le debe dar a estos residuos tomando en cuenta los múltiples factores que estos toman, tanto los sociales, ambientales, económicos, políticos y técnicos. Además, se demostró que en una planta de tratamiento la necesidad de recuperación y refinamiento del oro es indispensable ya que éste tiene un valor económico significativo al momento de la reincorporación de las materias primas.

Los RAEE se componen aproximadamente en un 51% de plástico y vidrio, metales básicos en un 42% (cobre, aluminio, hierro, níquel), metales pesados en un 7% (Mercurio, plomo, cadmio) y en un 1% metales preciosos (como oro, plata, platino); por lo cual es necesario aprovechar estos recursos, ya que es posible recuperar la mayoría de esta materia prima para devolverla al ciclo productivo, fomentando una economía circular.

En esta tesis, debido a que en México no existe un plan en donde se especifique cómo debe de manejarse los RAEE, se planteó una propuesta para el manejo integral de los RAEE en México, con 6 fases críticas a seguir:

1. **Recolección y transporte:** se planteó la necesidad de hacer análisis de la población para crear perfiles adecuados y así tener centros de acopio estratégicos, que requieren de la coordinación entre las autoridades y la población.
2. **Recepción y almacenamiento:** se destacó la importancia de manejar los posibles residuos peligrosos conforme al Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Residuos Peligrosos y hacer una clasificación de los aparatos recaudados que sea breve y clara.
3. **Desmontaje y separación:** se mostró la necesidad de quitar manualmente los componentes básicos que recubren a los aparatos como carcasas y baterías.
4. **Técnicas de tratamiento:** se concluyó que es importante aplicar las correspondientes técnicas dependiendo los componentes y las materias primas.
5. **Refinamiento:** Esta fase es aplicada a la materia prima que lo requiera, como lo son el oro o la plata, para que se remueva cualquier impureza que pudiese quedar.
6. **Reincorporación de la materia prima al ciclo productivo:** se obtuvo que la mayor rentabilidad que puede tener una planta de tratamiento de RAEE es con la recuperación de oro de estos residuos, ya que es la materia prima mejor cotizada en el mercado y es necesario especializar un tratamiento exclusivo para la extracción de este material.

- *Conclusión sobre la situación de los RAEE en México y en el mundo:*

Se investigó en medios electrónicos e impresos, además se analizó en diferentes conjuntos de datos aplicando los algoritmos de regresión lineal y agrupamiento k-means logrando concluir que año tras año la generación de RAEE en el mundo aumentará en un aproximado del 3%, esto es alarmante considerando que en 2019 y 2020 se generaron 53.600 Mt y 55.200 Mt respectivamente; Asia es el continente que más residuos produce con 26 Mt aproximadamente, debido a que tiene la población más grande en el mundo, por otro lado, América y Europa generan 13 y 10 Mt respectivamente, a pesar de que su generación sea mayor per cápita con 9.5 kg/hab y 15.2 kg/hab comparado con Asia que es de 9.4 kg/hab.

También Europa es el continente que más leyes tiene respecto al manejo de los RAEE por lo que lleva la delantera en el reciclaje en el mundo con el 55.08%, después Asia con 30.72%, mientras que América solo un 13.31%. Sin embargo, esto no es suficiente, ya que Europa genera más de 10 Mt al año, y aun siendo la que más recicla, sólo es aproximadamente el 40%. Además, de los 53,600 kt métricas generadas en 2019 mundialmente, sólo el 16% aproximadamente fue reciclado, denotando que mientras se tengan mejores normativas y planes de manejo más se recicla. Por lo que existe una gran ventana de oportunidad para reciclar y aprovechar estas materias primas, implementando minería electrónica y leyes o normativas que ayuden a gestionar estos residuos, especialmente en los países más desarrollados.

Diferentes países generan millones de toneladas de basura electrónica, siendo los países más industrializados los que generan la mayor cantidad, como Inglaterra que genera aproximadamente 23.9 kg per cápita o China que al ser un país con una población mucho más grande con 146 millones, incluso sin tener una generación per cápita alta 7.2 kg, es el mayor generador con aproximadamente 10 Mt, por lo cual se espera que mientras más se industrializa un país y su población aumente generará más de estos residuos.

En el caso de México se generan aproximadamente 9.7 kg per cápita y 1.2 Mt de RAEE al año, y a esto hay que agregar que no se tienen medidas o estrategias específicas para gestionar estos residuos, así como falta de leyes y normativas que regulen su correcto tratamiento en el país, por lo que es necesario comenzar a crear e impulsarlas.

- *Conclusión sobre las problemáticas que conllevan los RAEE:*

Una vez sistematizada la información sobre los problemas de los RAEE se logró comprobar su complejidad revelando sus múltiples impactos a la salud, ambiental, económicos, sociales y políticos, que involucra varios sectores, ya que la fabricación de un producto eléctrico electrónico produce la sinergia entre millones de personas e industrias diversas, desde la minería que obtiene la materia prima, el fabricante que diseña y ensambla (con ayuda de muchas otras fábricas complementarias), hasta las estrategias de mercado que se usan para vender los productos a los consumidores, en el marco legal de un país en una sociedad globalizada. Con ayuda de la comprensión de estos diversos impactos y sectores se podrá implementar un plan de manejo integral de los RAEE.

Concluyendo que la mayor problemática de no tratar correctamente los RAEE, es la contaminación al ambiente, dañando al aire por las malas técnicas de reciclaje, como la incineración, al suelo con los lixiviados de los metales, siendo persistente y que se incrementará con el tiempo, lo cual conlleva a daños a la salud de las personas que están involucradas en los reciclajes clandestinos o están cerca de los rellenos sanitarios, dañando principalmente al sistema inmunológico. Por lo que es necesario cambios políticos implementando normas y haciendo manejos sustentables, aprovechando los recursos limitados, obteniendo beneficios económicos con plantas de tratamiento y sociales con nuevos empleos.

- *Conclusión sobre la clasificación de los RAEE:*

Se llegó a que es de gran importancia clasificar a los RAEE para poder darles un mejor manejo y simplificar, ya que existen diversos AEE, por lo cual se propuso la clasificación de la UE en su directiva 2012/19/UE separando en 6 categorías: Aparatos de intercambio de temperatura; Monitores y pantallas; Lámparas; Grandes aparatos; Pequeños aparatos; Equipos de informática y telecomunicaciones pequeños. Debido a que esta clasificación ha funcionado en los países que lideran en reciclaje de los RAEE, ya que simplifica en pocas categorías con características bien definidas para las diferentes etapas del proceso de reciclaje, así como el separar los componentes contaminantes.

- *Conclusión sobre la legislación de los RAEE:*

En cuanto a la normatividad nacional e internacional sobre los RAEE se concluyó que el gobierno debe facilitar el reciclaje mediante una normativa que incentive a los productores a cumplir con la recepción y tratamiento dentro de un plan de manejo. Incluyendo una ley que estipule las medidas que debe de tomar en una planta formal de tratamiento, ya que existen técnicas con alto riesgo como el manejo de ácidos.

Gobiernos de diferentes países en el mundo están tomando acciones que benefician tanto a productores como a los consumidores, de manera que sería una buena idea tomar medidas parecidas, pero desarrolladas desde el enfoque que sea más aprovechable para nuestro país, como clasificar en pocas categorías a estos aparatos de manera general como es propuesto anteriormente, semejante a la utilizada por la UE, para su separación y tratamiento; Implementar un impuesto a los AEE para contar con recursos cuyo fin sea incentivar o crear campañas de reciclaje que favorezcan a los fabricantes y en contramedida multas para los productores que no respeten los acuerdos. Y la creación de centros de acopio que faciliten la recepción de estos RAEE en lugares estratégicos de la ciudad.

Para lograr esto los productores deben de facilitar la reparación de sus productos, ya sea proporcionando piezas o componentes, que se descomponen por el tiempo o por accidentes, por ejemplo, poder cambiar la cámara que dejó de funcionar de un smartphone sin tener que comprar uno nuevo. También es necesario que se involucren en el reciclado de sus propios AEE, ya sea recibiendo estos de parte de los consumidores para ser llevados a una planta de tratamiento o reciclándolos ellos mismos.

Los consumidores deben de hacer conciencia en su consumo para evitar los excesos innecesarios, además de su vital participación al no acumular RAEE y llevar estos a los centros autorizados.

- *Conclusión sobre las diferentes etapas para la recuperación de materiales con valor económico*

Se vio la importancia de definir paso a paso la forma de manejar los RAEE para poder recuperar de ellos materia prima con valor económico, ya que es complejo desarmar y extraer los diferentes componentes y materiales, teniendo en cuenta los componentes que son dañinos para la salud y al medio ambiente.

Es claro que para que este proceso de reciclaje pueda ser sustentable debe ser económicamente factible, ya que este implica muchos gastos, la constante compra de equipos especializados para tratar los diferentes RAEE que existen, la investigación y desarrollo de sistemas de reciclaje y técnicas de tratamiento, el sueldo de los trabajadores, entre otros costos mencionados en capítulos anteriores.

Para lograr esto cuando los RAEE lleguen a la planta de tratamiento al ser clasificados se debe revisar si puede ser recuperados o reparados para volverse a vender, o en caso de que no, este debe ser separado cuidadosamente para extraer los componentes peligrosos y los que pueden ser aún utilizables, como una memoria RAM de una computadora en buen estado; después de esto se requieren expertos para aplicar las técnicas de tratamiento, como la trituración o separación magnética, con las cuales se recupere materia prima valiosa, para finalmente su venta y reincorporación al ciclo productivo, concluyendo el proceso de reciclaje, convirtiendo a una economía más sustentable y circular.

- *Conclusión sobre la recuperación de oro en computadoras:*

Finalmente, se mostraron diferentes técnicas y procesos para recuperar materiales con valor económico de los RAEE, como la trituración, la separación magnética y por aire, el enfriamiento criogénico, la disolución en mezcla ácida, el proceso pirometalúrgico, el calcinado, entre otros.

De estos procesos se propuso el de disolución en mezcla ácida de forma experimental, porque esta tiene una alta efectividad en separación y extracción del oro en computadoras, ya que el oro representa la materia prima mayor valorada económicamente, en una tonelada de RAEE, como se mostró en el capítulo IV y este proceso sería importante para una buena rentabilidad en una planta de tratamiento.

- *Discusión de trabajo futuro*

Queda como trabajo a futuro realizar la prueba de la implementación de la propuesta de plan de manejo planteada en esta tesis para llevarla a la realidad, considerando los diferentes factores planteados y también con las técnicas de tratamiento de disolución en mezcla ácida para recuperar el oro de los RAEE. Además, seguir la propuesta, pero implementando otras técnicas de tratamiento.

Todo esto con el objetivo de ayudar a implementar un sistema eficiente de reciclaje en México y así lograr la meta de poner en marcha la primera planta de tratamiento formal de RAEE en México.

## Bibliografía consultada

- [1] ACRR. (2002). *Guía dirigida a Autoridades Locales y Regionales*. Recuperado el 11 de septiembre del 2017, de <http://www.residuoselectronicos.net/archivos/documentos/LaGestionRAEE.pdf>
- [2] ACS Recycling. (2021). *¿Qué es la minería urbana?* Recuperado el 12 de febrero de 2021, de <https://acsrecycling.es/mineria-urbana/>
- [3] Argentina ambiental. (2010). *Resolución 389/10. Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE)*. Recuperado el 10 de septiembre del 2020, de <http://argentinambiental.com/legislacion/buenos-aires/resolucion-38910-residuos-aparatos-electricos-electronicos-raee/>
- [4] Asociación Geoinnova. (2016). *Minería a cielo abierto y sus impactos en el medio ambiente*. Recuperado el 20 de abril de 2021, de <https://geoinnova.org/blog-territorio/mineria-cielo-abierto-impactos/>
- [5] Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *Observatorio mundial de los residuos electrónicos 2020: Cantidades, flujos, y potencial de la economía circular*. Recuperado el 20 de octubre del 2021, de <https://residuoselectronicosal.org/2021/03/observatorio-mundial-de-los-residuos-electronicos-2020-version-en-espanol/>
- [6] Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). *Observatorio mundial de los residuos electrónicos 2017: Cantidades, Flujos, y Recursos*. Recuperado el 10 de septiembre del 2020, de [https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/GEM\\_2017-S.pdf](https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/GEM_2017-S.pdf)
- [7] Banco Mundial. (2020). *Promedio de población residente en México*. Recuperado el 10 de septiembre del 2020, de <https://www.bancomundial.org/es>
- [8] Cáceres, J. H. (2015). *Clustering basado en el algoritmo K-means para la identificación de grupos de pacientes quirúrgicos*. Recuperado el 20 de octubre del 2021, de [https://www.udi.edu.co/congreso/historial/congreso\\_2016/ponencias/Ingenieria\\_de\\_sistemas/JAVIER\\_HERNANDEZ\\_CACERES.pdf](https://www.udi.edu.co/congreso/historial/congreso_2016/ponencias/Ingenieria_de_sistemas/JAVIER_HERNANDEZ_CACERES.pdf)
- [9] Castellanos, N. (2005). *La chatarra electrónica, la contaminación ambiental y su efecto económico*. Recuperado el 20 de marzo de 2020, del Forum de Ciencia y Tecnología. La Habana, Cuba.
- [10] Christopher M. (2003) *Logística, Aspectos Estratégicos*. Limusa, México. P45
- [11] Cuevas, H. (2013). *Reciclaje y afinación del oro a partir de chatarra electrónica*. [Tesis que para obtener el título de ingeniero químico industrial, IPN] pp. 120. Recuperado el 13 de julio de 2020 de, Repositorio DSpace institucional IPN: <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/17028>

- [12] Cui, J. & Zhang, L. (2008). *Metallurgical Recovery of Metal from Electronic Waste* Recuperado el 30 de agosto del 2020, de Journal of Hazardous Material,158, pp.228-56.
- [13] Directiva 2002/96/EC de la Unión Europea. (2003). *Directiva EU RAEE, 2002/96/CE del Parlamento Europeo y del consejo del 27 de enero del 2003 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.* Recuperado el 10 de septiembre del 2020, de <https://www.boe.es/doue/2003/037/L00024-00039.pdf>
- [14] Directiva 2012/19/UE de la Unión Europea. (2012). *Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) Texto pertinente a efectos del EEE.* Recuperado el 10 de septiembre del 2020, de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32012L0019>
- [15] EcoComputo. (2019) *En el 2019 se han recolectado 1.200 toneladas de residuos eléctricos y electrónicos en Colombia.* Recuperado el 17 de enero de 2021, de <https://ecocomputo.com/noticias/en-el-2019-se-han-recolectado-1200-toneladas-de-residuos-el-ctricos-y-electr-nicos-en>
- [16] Ecoembes. (2020). *Proceso de recogida, selección y reciclaje.* Recuperado el 17 de enero de 2021, de <https://www.ecoembes.com/es/ciudadanos/envases-y-proceso-reciclaje/proceso-recogida-seleccion-reciclaje>
- [17] Economía circular. (2017). *Economía circular.* Recuperado el 19 de enero de 2021, de <https://economiecircular.org/economia-circular/>
- [18] Ecorecikla. (2018). *Reciclado de componentes electrónicos.* Recuperado el 17 de noviembre de 2020, de <http://www.ecorecikla.com/>
- [19] Ecotic. (2016). *Reciclaje.* Recuperado el 21 de abril de 2021, de <https://www.ecotic.es/es/246570/Reciclaje.htm>
- [20] EuropaPress. (2008). *Greenpeace denuncia que lo residuos electrónicos de europa EEU y Japón están contaminando Ghana.* Greenpeace. Recuperado el 7 de abril de 2020, de <https://www.europapress.es/epsocial/noticia-greenpeace-denuncia-residuos-electronicos-europa-eeu-japon-estan-contaminando-ghana-20080805135229.html>
- [21] Estévez, R. (2014). *Obsolescencia programada: Tipos y formas.* Ecointeligencia. Recuperado el 12 de novimebre de 2020, de <https://www.ecointeligencia.com/2014/06/obsolescencia-programada-tipos-formas/>
- [22] Gobierno de Chile, Ministerio de minería. (2021). *Precios del Litio.* Recuperado el 27 de junio de 2021, de <https://www.minmineria.cl/precios-del-litio/>
- [23] Gobierno de México. (2020). *Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental - Residuos sólidos.* Recuperado el 20 de octubre del 2021, de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/indicadores-basicos-del-desempeno-ambiental--residuos-solidos>

- [24] GoldPriceTicket. (2021). *Precio del oro hoy en México*. Recuperado el 27 de junio de 2021, de <https://www.goldpriceticker.com/es/gold-rates/mexico/>
- [25] Gómez, H., Vega, C., Davila, R., Velazco, F. & Chapa, J. (2015). *Impactos de lixiviado generado en relleno sanitario en el municipio de Linares (Nuevo León) sobre la calidad del agua superficial y subterránea*. Revista Mexicana de Ciencias geológicas, 32(3). Recuperado el 21 de marzo de 2020, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1026-87742015000300514](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742015000300514)
- [26] Guadarrama, P. (2016). *Propuesta para el manejo de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) principalmente televisores analógicos*. UNAM. Recuperado el 23 de agosto de 2020, de <http://132.248.9.195/ptd2016/febrero/0741371/0741371.pdf>
- [27] Gutiérrez D. (2008). *The E waste Group Especialistas en segregación e integración de residuos eléctricos, electrónicos y tecnológicos*. Recuperado el 4 de octubre del 2018, de <https://www.thewaste.com/>
- [28] Hernandez M. (2019). *Agua Regia*. Recuperado el 14 de abril de 2021 de <https://www.laverdad.es/ababol/ciencia/agua-regia-20191019005323-ntvo.html>
- [29] ÍNDIGO AMBIENTAL. (2014). *Plan de manejo de los Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos RAEE*. Recuperado el 14 de septiembre del 2020, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/190023/Plan\\_de\\_Manejo\\_de\\_Residuos\\_de\\_Aparatos\\_electronicos\\_y\\_electricos\\_RAEE.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/190023/Plan_de_Manejo_de_Residuos_de_Aparatos_electronicos_y_electricos_RAEE.pdf)
- [30] INECC. (2013). *Contenido de materiales en una computadora*. Recuperado el 21 de abril de 2021, de <https://www.gob.mx/inecc>
- [31] INEGI. (2020). *Población en México*. Recuperado el 21 de Abril de 2021, de <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>
- [32] Insignares, F. (2019). *Plan estratégico de negocios de una planta de reciclaje de basura tecnológica en Barranquilla*. Recuperado el 30 de abril de 2020, de la Fundación Universidad del Norte. Maestría en Ciencias Administrativas. Barranquilla, Colombia (2007).
- [33] Khaliq, A., Akbar, M. (et al). (2014). *Metal Extraction processes for Electronic Waste and Existing Industrial Routers*. Resources, 2014(3), pp.152-179. Recuperado el 30 de marzo de 2020.
- [34] Lagos, G. (2010). *El cobre y el medio ambiente*. Recuperado el 14 de septiembre del 2020, de [https://www.umanda.cl/docs/Cobre\\_Salud\\_Medio\\_Ambiente\\_Nuevas\\_Tecnologias.pdf](https://www.umanda.cl/docs/Cobre_Salud_Medio_Ambiente_Nuevas_Tecnologias.pdf)
- [35] Lira, I. (2016). *México, entre los países que más basura generan en América, urge Ley para regular empresas*. Recuperado el 11 de septiembre del 2020, de <http://www.sinembargo.mx/27-03-2016/1638962>
- [36] Méndez, A. (2010). *Pirometalurgia*. Recuperado el 14 de abril de 2021 de <https://quimica.laguia2000.com/reacciones-quimicas/pirometalurgia>

- [37] MINAMBIENTE(2017). *Política Nacional y Gestión integral de los residuos electrónicos*. Recuperado el 19 de julio de 2021, de [https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/e-book\\_rae\\_/siglas.html](https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/e-book_rae_/siglas.html)
- [38] Ministerio de Ecología y Medio Ambiente de China. (2019). *"Waste Electrical and Electronic Products Processing Information System"*. Recuperado el 19 de julio de 2021, de <http://weee.mepscc.cn/Index.do>
- [39] Miteco. Gobierno de España. (2018). *Ejemplo de diferentes tipos de metales en un teléfono móvil*. Recuperado el 23 de agosto de 2020, de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/aparatos-electr/electricos-y-electronicos-materiales-y-componentes.aspx>
- [40] Motan colortronic. (2019). *Extrusión*. Recuperado el 11 de septiembre del 2020, de.
- [41] Namias, J. (2013). *The future of electronic waste Recycling in the US*. Recuperado el 14 de septiembre del 2020, de Columbia: Earth Engineering Center. Columbia University.
- [42] Odeyingbo, O., Nnorom, I. & Deubzer O. ( 2017). *Person in the Port Project – Assessing Import of Used Electrical and Electronic Equipment into Nigeria*. Recuperado el 20 de abril de 2021, de [http://collections.unu.edu/eserv/UNU:6349/PiP\\_Report.pdf](http://collections.unu.edu/eserv/UNU:6349/PiP_Report.pdf)
- [43] Oxfam. (2018). *Contaminación de la atmósfera: causas y soluciones*. Recuperado el 20 de abril de 2021, de <https://blog.oxfamintermon.org/contaminacion-de-la-atmosfera-causas-y-soluciones/>
- [44] Peralta, L. (2012). *Una ley mejorará el tratamiento de la basura electrónica en México, el desecho de dispositivos electrónicos en el país es un negocio que se valora en unos 357 millones de dólares*. Recuperado el 11 de septiembre del 2020, de [https://expansion.mx/planetacnn/2012/03/04/una-ley-mejorara-el-tratamiento-de-la-basura-electronica-en-mexico?internal\\_source=PLAYLIST](https://expansion.mx/planetacnn/2012/03/04/una-ley-mejorara-el-tratamiento-de-la-basura-electronica-en-mexico?internal_source=PLAYLIST)
- [45] PERÚ Ministerio del Ambiente (2018) *El manejo adecuado de los RAEE es urgente en el Perú*. Recuperado el 19 de julio del 2021, de <https://www.minam.gob.pe/gestion-de-residuos-solidos/manejo-de-raee/>
- [46] Prince, A. (2006). *La basura informática en Buenos Aires ¿amenaza u oportunidad?* Recuperado el 20 de abril de 2021, de <https://www.monografias.com/trabajos-pdf5/latinoamerica-verde-basura-electronica/latinoamerica-verde-basura-electronica.shtml>
- [47] PROFEPA. (2016). *Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos*. Recuperado el 11 de septiembre del 2020, de <https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-general-para-la-prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos-62914>
- [48] RECÍCLAME. (2003). *RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos)*. Recuperado el 10 de septiembre del 2020, de <http://www.reciclame.info/legislacion/raee-residuos-de-aparatos-electricos-y-electronicos/>

- [49] Recupera. (2018). *Centros de reciclaje*. Recuperado el 10 de octubre de 2020 de, <https://www.recuperamexico.com/>
- [50] Reina, S. (2021). *¿En qué consiste el servicio de recolección de basura?*. Recuperado el 14 de Abril de 2021, de <https://www.recolecciondebasuraseredecom.com.mx/en-que-consiste-el-servicio-de-recoleccion-de-basura>
- [51] REMSA. (2018). *Reciclaje de aparatos electrónicos*. Recuperado el 21 de noviembre de 2020, de <https://reciclaelectronicos.com/>
- [52] Rezagos (2020). *Legislación RAEE en el mundo*. Recuperado el 11 de septiembre del 2017, de <http://www.rezagos.com/pages/legislacion>
- [53] Rosas, M. (2012). *Propuesta de un proceso de recolección de residuos electrónicos para motivar la participación en poblaciones definidas*. Recuperado el 24 de octubre de 2021, de [Tesis de maestría, UNAM]. Repositorio institucional UNAM: [https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/XPVDPULE7I7G4F118GK1HMLUI4PLBCALR9DIV2288E3SRJ5GQN-36934?func=find-b&local\\_base=TESO1&request=Propuesta+de+un+proceso+de+recolecti%C3%B3n+de+residuos+electr%C3%B3nicos+para+motivar+la+participaci%C3%B3n+en+poblaciones+definidas&find\\_codigo=WRD&adjacent=N&filter\\_code\\_2=WYR&filter\\_request\\_2=&filter\\_code\\_3=WYR&filter\\_request\\_3=](https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/XPVDPULE7I7G4F118GK1HMLUI4PLBCALR9DIV2288E3SRJ5GQN-36934?func=find-b&local_base=TESO1&request=Propuesta+de+un+proceso+de+recolecti%C3%B3n+de+residuos+electr%C3%B3nicos+para+motivar+la+participaci%C3%B3n+en+poblaciones+definidas&find_codigo=WRD&adjacent=N&filter_code_2=WYR&filter_request_2=&filter_code_3=WYR&filter_request_3=)
- [54] SAR. (2017). *Manejo de RAEE*. Recuperado el 19 de junio del 2021, de <https://www.sar.pe/el-manejo-adeecuado-de-los-raee-es-urgente-en-el-peru/>
- [55] Scikit-learn. (2019). *Documentation of scikit-learn*. Recuperado el 20 de octubre del 2021, de <https://scikit-learn.org/0.21/documentation.html>
- [56] SEDEMA. (2021). *Reciclatron*. Recuperado el 21 de octubre del 2020, de <https://www.sedema.cdmx.gob.mx>
- [57] SEMARNAT. (2015). *Convenio de Estocolmo*. Recuperado el 10 de septiembre del 2020, de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convenio-de-estocolmo>
- [58] SEMARNAT. (2015). *Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación*. Recuperado el 10 de septiembre del 2020, de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convenio-de-basilea>
- [59] SEMARNAT. (2015). *Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente*. Recuperado el 04 de marzo de 2021, de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/148.pdf>
- [60] SEMARNAT. (2015). *NOM-052-SEMARNAT-2005*. Recuperado el 04 de marzo de 2022, de <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/1055/SEMARNA/SEMARNA.htm#:~:text=Esta%20Norma%20Oficial%20Mexicana%20establece,que%20se%20consideren%20como%20tales.>

- [61] SEMARNAT. (2019). *Plan de manejo*. Recuperado el 04 de marzo de 2021, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/26147/plandemanejo.pdf>
- [62] SEMARNAT. (2011). *PROY-NOM-160-SEMARNAT-2011*. Recuperado el 14 de Abril de 2021 de <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4466/semarnat/semarnat.htm>
- [63] Statista. (2021). *Cantidad de teléfonos inteligentes vendidos a usuarios finales en todo el mundo desde 2007 hasta 2021*. Recuperado el 20 de octubre del 2021, de <https://www.statista.com/statistics/263437/global-smartphone-sales-to-end-users-since-2007/>
- [64] Statista. (2017). *La basura tecnológica, toda una mina de oro*. Recuperado el 20 de octubre del 2021, de <https://es.statista.com/grafico/12341/chatarra-que-vale-oro/>
- [65] Sreetips. (2015, 13 septiembre). *How To Recover Gold From Computer Scrap with Household Chemicals* [video]. Recuperado el 21 de abril de 2021, de Youtube <https://youtu.be/2sZUAprS5KI>
- [66] Supraciclaje. (2021). *Compra/Venta de chatarra y reciclados por kilogramos*. Recuperado el 27 de junio de 2021, de <https://www.supraciclaje.com/precios-hoy/>
- [67] Temáticas. (2021), *Precio Niquel*. Recuperado el 27 de junio de 2021, de <https://tematicas.org/indicadores-economicos/economia-internacional/precios/precio-niquel/>
- [68] UNESCO-RELAC. (2010). *Los residuos electrónicos: Un desafío para la sociedad del conocimiento en América Latina y el Caribe*. Recuperado el 11 de septiembre del 2020, de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000190020>
- [69] USC (2012). *Regresión lineal simple*. Recuperado el 20 de octubre del 2021, de [http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOS-PHP-DPTO/MATERIALES/Mat\\_50140116\\_Regr\\_%20simple\\_2011\\_12.pdf](http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOS-PHP-DPTO/MATERIALES/Mat_50140116_Regr_%20simple_2011_12.pdf)
- [70] Valero, A. (2010). *Physical genomics: Combining the exergy and Hubbert peak analysis for predicting mineral resources depletion*. Recuperado el 21 de noviembre de 2020, de <http://www.exergoecology.com/resources/exergoecology-bibliography/Valero2010d>
- [71] Villanueva T. (2008). *Los metales en Castilla y en León*. Recuperado el 11 de septiembre del 2020, de <http://www.siemcalsa.com/images/pdf/Los%20metales.pdf>
- [72] Worldforexrates (2021). *Tasa de plata hoy en México*. Recuperado el 27 de junio de 2021, de <https://www.worldforexrates.com/es/xag/mxn/1-exchange-rate/>

## Anexo 1: Código de Python para el análisis de datos

- Pronóstico con regresión lineal de los RAEE generados en el mundo por año

### ▼ Importar las bibliotecas y los datos

```
# Para la manipulación y análisis de datos
import pandas as pd
# Para crear vectores y matrices n dimensionales
import numpy as np
# Para la generación de gráficas a partir de los datos
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib import style
# Para la visualización de datos basado en matplotlib
import seaborn as sns
%matplotlib inline

# Preprocesado y modelado
from scipy.stats import pearsonr
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import r2_score
from sklearn import metrics
import statsmodels.api as sm
import statsmodels.formula.api as smf

# Configuración matplotlib
plt.rcParams['image.cmap'] = "bwr"
#plt.rcParams['figure.dpi'] = "100"
plt.rcParams['savefig.bbox'] = "tight"
style.use('ggplot') or plt.style.use('ggplot')

import warnings
```

### ▼ Acceso de los datos

```
Data = pd.read_csv('RAEE-Generados-Mundo.csv')
Data
```

	Año	RAEE generados (Kt)	RAEE generados (kg/hab.)
0	2014	40000	5.7
1	2015	42235	5.9
2	2016	44700	6.1
3	2017	46935	6.3
4	2018	49170	6.7
5	2019	53600	7.3

```
# Correlación lineal entre los años y los RAEE generados
corr_test = pearsonr(x = Data['Año'], y = Data['RAEE generados (Kt)'])
print("Coeficiente de correlación de Pearson: ", corr_test[0])
print("P-value: ", corr_test[1])
```

Coeficiente de correlación de Pearson: 0.9913467780050867  
P-value: 0.00011199340727609064

```
# Correlación lineal entre los años y los RAEE generados (kg/hab.)
corr_test2 = pearsonr(x = Data['Año'], y = Data['RAEE generados (kg/hab.)'])
print("Coeficiente de correlación de Pearson: ", corr_test2[0])
print("P-value: ", corr_test2[1])
```

Coeficiente de correlación de Pearson: 0.967912086746998  
P-value: 0.0015279318593224068

### ➤ *RAEE generados por año*

```
[ ] #RAEE generados por año
# División de los datos en entrenamiento y prueba
# =====
X1 = Data['Año']
y1 = Data[['RAEE generados (Kt)']]

X1_train, X1_test, y1_train, y1_test = train_test_split(
    X1.values.reshape(-1,1),
    y1.values.reshape(-1,1),
    train_size = 0.9,
    random_state = 1234,
    shuffle = True
)

# Creación del modelo
# =====
modelo = LinearRegression()
modelo.fit(X = X1_train.reshape(-1, 1), y = y1_train)
```

LinearRegression(copy\_X=True, fit\_intercept=True, n\_jobs=None, normalize=False)

```
[ ] #Obtenemos la pendiente y ordenada en el origen del modelo
print(modelo.coef_)
print(modelo.intercept_)
```

```
[[2597.44186047]]
[-5191613.25581395]
```

```
#R-cuadrado tiene la propiedad útil de que su escala es intuitiva, va de 0 a 1,
#con 0 indicando que el modelo propuesto no mejora la predicción sobre el modelo medio y 1 i
print("Coeficiente de determinación R^2:", modelo.score(X1_train.reshape(-1, 1), y1_train))
```

Coeficiente de determinación R^2: 0.9825383646667837

```

# Error de test del modelo
predicciones = modelo.predict(X = X1_test)
# print(predicciones[0:3,])

y1_pred = predicciones

print('Mean Absolute Error:', metrics.mean_absolute_error(y1_test, y1_pred))
print('Root Mean Squared Error:', np.sqrt(metrics.mean_squared_error(y1_test, y1_pred)))

Mean Absolute Error: 129.53488372080028
Root Mean Squared Error: 129.53488372080028

```

## ↳ **RAEE generados (kg/hab.) por año**

```

#RAEE generados (kg/hab.) por año
# División de los datos en entrenamiento y prueba
# -----
X2 = Data['Año']
y2 = Data[['RAEE generados (kg/hab.)']]

X2_train, X2_test, y2_train, y2_test = train_test_split(
    X2.values.reshape(-1,1),
    y2.values.reshape(-1,1),
    train_size = 0.8,
    random_state = 1234,
    shuffle = True
)

# Creación del modelo
# -----
modelo2 = LinearRegression()
modelo2.fit(X = X2_train.reshape(-1, 1), y = y2_train)

LinearRegression(copy_X=True, fit_intercept=True, n_jobs=None, normalize=False)

#Obtenemos la pendiente y ordenada en el origen del modelo
print(modelo2.coef_)
print(modelo2.intercept_)

[[0.3]]
[-598.6]

print("Coeficiente de determinación R^2:", modelo2.score(X2_train.reshape(-1, 1), y2_train))

Coeficiente de determinación R^2: 0.9264705882352605

```

```
# Error de test del modelo
predicciones2 = modelo2.predict(X = X2_test)
# print(predicciones[0:3,])

y2_pred = predicciones2

print('Mean Absolute Error:', metrics.mean_absolute_error(y2_test, y2_pred))
print('Root Mean Squared Error:', np.sqrt(metrics.mean_squared_error(y2_test, y2_pred)))
```

Mean Absolute Error: 0.04999999999997762  
 Root Mean Squared Error: 0.07071067811860678

### ▼ **Predicción**

```
nuevo_x = np.array([2020,2021,2022,2023,2024,2025,2026,2027,2028,2029,2030,2050,2100])
prediccion1 = modelo.predict(nuevo_x.reshape(-1,1))
```

```
prediccion2 = modelo2.predict(nuevo_x.reshape(-1,1))
```

prediccion1	prediccion2
array([[ 55219.30232558],	array([[ 7.4],
[ 57816.74418605],	[ 7.7],
[ 60414.18604651],	[ 8. ],
[ 63011.62790698],	[ 8.3],
[ 65609.06976744],	[ 8.6],
[ 68206.51162791],	[ 8.9],
[ 70803.95348837],	[ 9.2],
[ 73401.39534884],	[ 9.5],
[ 75998.8372093 ],	[ 9.8],
[ 78596.27906977],	[10.1],
[ 81193.72093023],	[10.4],
[133142.55813954],	[16.4],
[263014.65116279]])	[31.4]])

➤ Pronóstico con regresión lineal de los RAEE generados en México por año

### ▼ **Importar las bibliotecas y los datos**

```

# Para la manipulación y análisis de datos
import pandas as pd
# Para crear vectores y matrices n dimensionales
import numpy as np
# Para la generación de gráficas a partir de los datos
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib import style
# Para la visualización de datos basado en matplotlib
import seaborn as sns
%matplotlib inline

# Preprocesado y modelado
from scipy.stats import pearsonr
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import r2_score
from sklearn import metrics
import statsmodels.api as sm
import statsmodels.formula.api as smf

# Configuración matplotlib
plt.rcParams['image.cmap'] = "bwr"
#plt.rcParams['figure.dpi'] = "100"
plt.rcParams['savefig.bbox'] = "tight"
style.use('ggplot') or plt.style.use('ggplot')

import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')

```

### ▼ Acceso de los datos

```
Data = pd.read_csv('RAEE-Generados-México.csv')
Data
```

	Año	RAEE generados (Kt)
0	2015	1065
1	2016	1106
2	2017	1146
3	2018	1183
4	2019	1220
5	2020	1256

### ▼ *RAEE generados por año en México*

```

#RAEE generados por año
# División de los datos en entrenamiento y prueba
# =====
X1 = Data['Año']
y1 = Data[['RAEE generados (Kt)']]

X1_train, X1_test, y1_train, y1_test = train_test_split(
    X1.values.reshape(-1,1),
    y1.values.reshape(-1,1),
    train_size = 0.9,
    random_state = 1234,
    shuffle = True
)

# Creación del modelo
# =====
modelo = LinearRegression()
modelo.fit(X = X1_train.reshape(-1, 1), y = y1_train)

LinearRegression(copy_X=True, fit_intercept=True, n_jobs=None, normalize=False)

#Obtenemos la pendiente y ordenada en el origen del modelo
print(modelo.coef_)
print(modelo.intercept_)

[[38.19767442]]
[-75901.62790698]

#R-cuadrado tiene la propiedad útil de que su escala es intuitiva, va de 0 a 1,
#con 0 indicando que el modelo propuesto no mejora la predicción sobre el modelo medio y 1
print("Coeficiente de determinación R^2:", modelo.score(X1_train.reshape(-1, 1), y1_train))

Coeficiente de determinación R^2: 0.9995965941616852

# Error de test del modelo
predicciones = modelo.predict(X = X1_test)
# print(predicciones[0:3,])

y1_pred = predicciones

print('Mean Absolute Error:', metrics.mean_absolute_error(y1_test, y1_pred))
print('Root Mean Squared Error:', np.sqrt(metrics.mean_squared_error(y1_test, y1_pred)))

Mean Absolute Error: 2.918604651160422
Root Mean Squared Error: 2.918604651160422

```

### ▼ **Predicción**

```

nuevo_x = np.array([2021,2022,2023,2024,2025,2026,2027,2028,2029,2030])
prediccion1 = modelo.predict(nuevo_x.reshape(-1,1))

```

```

prediccion1
array([[1295.87209302],
       [1334.06976744],
       [1372.26744186],
       [1410.46511628],
       [1448.6627907 ],
       [1486.86046512],
       [1525.05813953],
       [1563.25581395],
       [1601.45348837],
       [1639.65116279]])

```

➤ Clustering K-Means de los países que más RAEE generan

### ▼ Importar las bibliotecas y los datos

```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns          #Para la visualización de datos
%matplotlib inline

#Algoritmo: K-means
from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.metrics import pairwise_distances_argmin_min

```

### ▼ Acceso a los datos

```

Data = pd.read_csv('RAEE-Generados-Paises.csv')
Data

```

	País	Región	RAEE generados (kt)	RAEE generados\n(kg/hab.)
0	Afganistán	Asia	23.0	0.6
1	Albania	Europa	21.0	7.4
2	Argelia	África	309.0	7.1
3	Angola	África	125.0	4.2
4	Antigua y Barbuda	Américas	1.2	12.7
...	...	...	...	...
175	Venezuela	Américas	300.0	10.7
176	Vietnam	Asia	257.0	2.7
177	Yemen	Asia	48.0	1.5
178	Zambia	África	19.0	1.0
179	Zimbabwe	África	17.0	1.1

180 rows × 8 columns

## ▼ Clustering particional

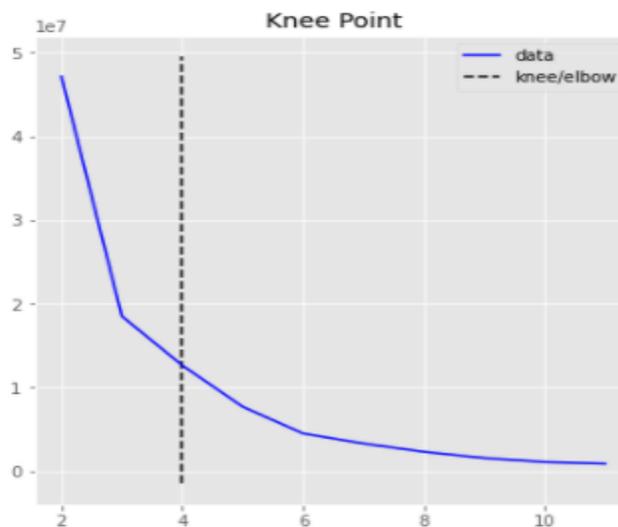
Algoritmo: K-means

```
#Definición de k clusters para K-means
#Se utiliza random_state para inicializar el generador interno de números aleatorios
SSE = []
for i in range(2, 12):
    km = KMeans(n_clusters=i, random_state=0)
    km.fit(MatrizVariables)
    SSE.append(km.inertia_)
```

```
from kneed import KneeLocator
kl = KneeLocator(range(2, 12), SSE, curve="convex", direction="decreasing")
kl.elbow
```

4

```
plt.style.use('ggplot')
kl.plot_knee()
```



```
#Se crean las etiquetas de los elementos en los clusters
MParticional = KMeans(n_clusters=4, random_state=0).fit(MatrizVariables)
MParticional.predict(MatrizVariables)
MParticional.labels_
```

```
array([[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
        0, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 2, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 2, 0, 0, 0, 0, 0,
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 0, 0,
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
        0, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
        0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 3, 0, 0, 0,
        0, 0, 0, 0], dtype=int32)
```

```
Data['clusterP'] = MParticional.labels_
pd.set_option('display.max_rows', None)
Data
```

## ▼ Resultados

```
Data.groupby(['clusterP'])['clusterP'].count()
```

```
clusterP
0      168
1         1
2       10
3         1
Name: clusterP, dtype: int64
```

```
CentroidesP = MParticional.cluster_centers_
pd.DataFrame(CentroidesP.round(4), columns=['RAEE generados (kt) ', 'RAEE generados\n(kg/hab.) ', 'RAEE\nrecogidos y \nreciclados\n(kg/hab.) ', 'Población (millones)'])
```

	RAEE generados (kt)	RAEE generados\n(kg/hab.)	RAEE\nrecogidos y \nreciclados\n(kg/hab.)	Población (millones)
0	110.2006	8.2756	16.3777	18.6340
1	10129.0000	7.2000	1546.0000	1406.8056
2	1804.1000	14.1900	354.5140	249.2515
3	6918.0000	21.0000	1020.0000	329.4286

➤ Clustering K-Means de RAEE generados en 180 países

## ▼ Importar las bibliotecas y los datos

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns          #Para la visualización de datos
%matplotlib inline

#Algoritmo: K-means
from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.metrics import pairwise_distances_argmin_min
```

## ▼ Acceso a los datos

```
Data = pd.read_csv('Mayores-Generadores-RAEE.csv')
Data
```

```
MatrizVariables = np.array(Data[['RAEE generados (Kt) (2016)', 'RAEE generados (Kt) (2019)', 'R
pd.DataFrame(MatrizVariables)
```

```
MatrizActual = Data.drop(['País'], axis=1)
```

### ▼ Clustering particional

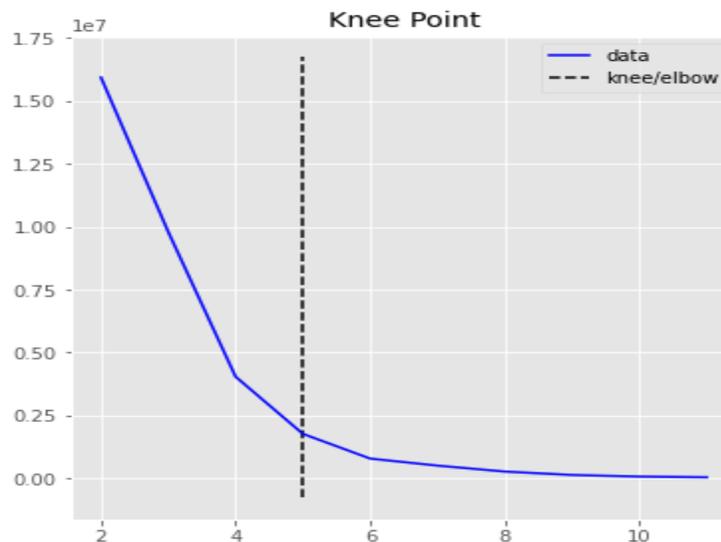
Algoritmo: K-means

```
#Definición de k clusters para K-means
#Se utiliza random_state para inicializar el generador interno de números aleatorios
SSE = []
for i in range(2, 12):
    km = KMeans(n_clusters=i, random_state=0)
    km.fit(MatrizVariables)
    SSE.append(km.inertia_)

from kneed import KneeLocator
kl = KneeLocator(range(2, 12), SSE, curve="convex", direction="decreasing")
kl.elbow
```

5

```
plt.style.use('ggplot')
kl.plot_knee()
```



```
#Se crean las etiquetas de los elementos en los clusters
MParticional = KMeans(n_clusters=5, random_state=0).fit(MatrizVariables)
MParticional.predict(MatrizVariables)
MParticional.labels_
```

```
array([1, 2, 3, 3, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 0, 0, 0, 0, 0], dtype=int32)
```

```
Data['clusterP'] = MParticional.labels_
Data
```

## ▼ Resultados

```
Data.groupby(['clusterP'])['clusterP'].count()
```

```
clusterP
0      5
1      1
2      1
3      2
4      6
Name: clusterP, dtype: int64
```

```
CentroidesP = MParticional.cluster_centers_  
pd.DataFrame(CentroidesP.round(4), columns=['RAEE generados (Kt) (2016)', 'RAEE generados (Kt) (2019)',
```

RAEE generados (Kt) (2016)	RAEE generados (Kt) (2019)
959.0	967.2000
7200.0	10129.0000
6300.0	6918.0000
2050.0	2899.5000
1550.0	1659.8333

RAEE generados (kg/hab.) (2016)	RAEE generados (kg/hab.) (2019)	Población (millones)
14.4400	14.4400	73.6129
5.2000	7.2000	1406.8056
19.4000	21.0000	329.4286
9.2000	11.4000	735.8824
15.3333	15.3167	139.0391

## Anexo 2: Conjuntos de datos

- RAEE generados en el mundo por año 2014-2019. Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

Año	RAEE generados (Kt)	RAEE generados (kg/hab.)
2014	40000	5.7
2015	42235	5.9
2016	44700	6.1
2017	46935	6.3
2018	49170	6.7
2019	53600	7.3

- RAEE generados en México para el año 2015-2020. Datos tomados de: (Gobierno de México, 2020).

Año	RAEE generados (Kt)
2015	1065
2016	1106
2017	1146
2018	1183
2019	1220
2020	1256

- Mayores generadores de RAEE en 2016 y 2019. Datos tomados de: (Baldé et al., 2020).

País	RAEE generados (Kt) (2016)	RAEE generados (Kt) (2019)	RAEE generados (kg/hab.) (2016)	RAEE generados (kg/hab.) (2019)	Población (millones)
China	7200	10129	5.2	7.2	1406.80556
Estados Unidos	6300	6918	19.4	21	329.428571
India	2000	3230	1.5	2.4	1345.83333
Japón	2100	2569	16.9	20.4	125.931373
Brasil	1500	2143	7.4	10.2	210.098039
Rusia	1400	1631	10.7	11.3	144.336283
Indonesia	1500	1618	4.9	6.1	265.245902
Alemania	1900	1607	22.8	19.4	82.8350516
Reino Unido	1600	1598	24.9	23.9	66.8619247
Francia	1400	1362	21.3	21	64.8571429
México	1106	1220	8.2	9.7	125.773196
Italia	1200	1063	18.9	17.5	60.7428571
España	900	888	20.1	19	46.7368421
Turquía	800	847	10	10.2	83.0392157
Corea del sur	789	818	15	15.8	51.7721519

➤ RAEE generados en 180 países 2019

País	Región	RAEE generados (kt)	RAEE generados (kg/hab.)	RAEE recogidos y reciclados oficialmente (kt)	Legislación/política	Población (millones)
Afganistán	Asia	23	0.6	0	No	38.3333333
Albania	Europa	21	7.4	0	Sí	2.83783784
Argelia	África	309	7.1	0	No	43.5211268

<b>Angola</b>	África	125	4.2	0	No	29.7619048
<b>Antigua y Barbuda</b>	Américas	1.2	12.7	0	No	0.09448819
<b>Argentina</b>	Américas	465	10.3	11	Sí	45.1456311
<b>Armenia</b>	Asia	17	5.8	0	No	2.93103448
<b>Aruba</b>	Américas	2.2	19.3	0	No	0.11398964
<b>Australia</b>	Oceanía	554	21.7	58	Sí	25.5299539
<b>Austria</b>	Europa	168	18.8	117	Sí	8.93617021
<b>Azerbaiyán</b>	Asia	80	8	0	No	10
<b>Bahamas</b>	Américas	6.6	17.2	0	No	0.38372093
<b>Bahrein</b>	Asia	24	15.9	0	No	1.50943396
<b>Bangladesh</b>	Asia	199	1.2	0	No	165.833333
<b>Barbados</b>	Américas	3.6	12.7	0	No	0.28346457
<b>Belarús</b>	Europa	88	9.3	6.2	Sí	9.46236559
<b>Bélgica</b>	Europa	234	20.4	128	Sí	11.4705882
<b>Belice</b>	Américas	2.4	5.8	0	No	0.4137931
<b>Benin</b>	África	9.4	0.8	0	No	11.75
<b>Bhután</b>	Asia	3.4	4	0	No	0.85
<b>Bolivia</b>	Américas	41	3.6	0	Sí	11.3888889
<b>Bosnia y Herzegovina</b>	Europa	27	7.8	0	Sí	3.46153846
<b>Botswana</b>	África	19	7.9	0	No	2.40506329
<b>Brasil</b>	Américas	2143	10.2	0.14	No	210.098039
<b>Brunei Darussalam</b>	Asia	8.7	19.7	0	No	0.44162437
<b>Bulgaria</b>	Europa	82	11.7	54.5	Sí	7.00854701
<b>Burkina Faso</b>	África	13	0.6	0	No	21.6666667
<b>Burundi</b>	África	5.3	0.5	0	No	10.6
<b>Cabo Verde</b>	África	2.8	4.9	0	No	0.57142857
<b>Camboya</b>	Asia	19	1.1	0	Sí	17.2727273

<b>Camerún</b>	África	26	1	0.05	Sí	26
<b>Canadá</b>	Américas	757	20.2	101	Sí	37.4752475
<b>República Centrafricana</b>	África	2.5	0.5	0	No	5
<b>Chad</b>	África	10	0.8	0	No	12.5
<b>Chile</b>	Américas	186	9.9	5.5	Sí	18.7878788
<b>China</b>	Asia	10129	7.2	1546	Sí	1406.80556
<b>China Hong Kong</b>	Asia	153	20.2	55.8	Sí	7.57425743
<b>China Macao</b>	Asia	12	18.1	0	Sí	0.66298343
<b>Colombia</b>	Américas	318	6.3	2.7	Sí	50.4761905
<b>Comoras</b>	África	0.6	0.7	0	No	0.85714286
<b>Congo</b>	África	18	4	0	No	4.5
<b>Costa Rica</b>	Américas	51	10	0	Sí	5.1
<b>Côte d'Ivoire</b>	África	30	1.1	0	Sí	27.2727273
<b>Croacia</b>	Europa	48	11.9	36	Sí	4.03361345
<b>Chipre</b>	Asia	15	16.8	2.5	Sí	0.89285714
<b>República Checa</b>	Europa	167	15.7	91	Sí	10.6369427
<b>Dinamarca</b>	Europa	130	22.4	70	Sí	5.80357143
<b>Djibouti</b>	África	1.1	1	0	No	1.1
<b>Dominica</b>	Américas	0.6	7.9	0	No	0.07594937
<b>República Dominicana</b>	Américas	67	6.4	0	No	10.46875
<b>Ecuador</b>	Américas	99	5.7	0.005	Sí	17.3684211
<b>Egipto</b>	África	586	5.9	0	Sí	99.3220339
<b>El Salvador</b>	Américas	37	5.5	0.56	No	6.72727273
<b>Eritrea</b>	África	3.4	0.6	0	No	5.66666667
<b>Estonia</b>	Europa	17	13.1	13	Sí	1.29770992
<b>Etiopía</b>	África	55	0.6	0	No	91.6666667

<b>Fiji</b>	Oceanía	5.4	6.1	0	No	0.8852459
<b>Finlandia</b>	Europa	110	19.8	65	Sí	5.55555556
<b>Francia</b>	Europa	1362	21	742	Sí	64.8571429
<b>Gabón</b>	África	18	8.7	0	No	2.06896552
<b>Gambia</b>	África	2.7	1.2	0	No	2.25
<b>Georgia</b>	Asia	27	7.3	0	No	3.69863014
<b>Alemania</b>	Europa	1607	19.4	837	Sí	82.8350516
<b>Ghana</b>	África	53	1.8	0	Sí	29.4444444
<b>Grecia</b>	Europa	181	16.9	56	Sí	10.7100592
<b>Granada</b>	Américas	1	8.8	0	No	0.11363636
<b>Guatemala</b>	Américas	75	4.3	0	No	17.4418605
<b>Guinea</b>	África	11	0.8	0	No	13.75
<b>Guinea Bissau</b>	África	1	0.5	0	No	2
<b>Guyana</b>	Américas	5	6.3	0	No	0.79365079
<b>Honduras</b>	Américas	25	2.6	0.2	No	9.61538462
<b>Hungría</b>	Europa	133	13.6	63	Sí	9.77941177
<b>Islandia</b>	Europa	7.6	21.4	5.3	Sí	0.35514019
<b>India</b>	Asia	3230	2.4	30	Sí	1345.83333
<b>Indonesia</b>	Asia	1618	6.1	0	No	265.245902
<b>Irán</b>	Asia	790	9.5	0	Sí	83.1578947
<b>Iraq</b>	Asia	278	7.1	0	No	39.1549296
<b>Ireland</b>	Europa	93	18.7	52	Sí	4.97326203
<b>Israel</b>	Asia	132	14.5	0	Sí	9.10344828
<b>Italy</b>	Europa	1063	17.5	369	Sí	60.7428571
<b>Jamaica</b>	Américas	18	6.2	0.05	No	2.90322581
<b>Japón</b>	Asia	2569	20.4	570	Sí	125.931373

<b>Jordania</b>	Asia	55	5.4	1.3	Sí	10.1851852
<b>Kazajstán</b>	Asia	172	9.2	10	No	18.6956522
<b>Kenya</b>	África	51	1	0	Sí	51
<b>Kiribati</b>	Oceanía	0.1	0.9	0	No	0.11111111
<b>Kuwait</b>	Asia	74	15.8	0	No	4.6835443
<b>Kirgistán</b>	Asia	10	1.5	0	No	6.66666667
<b>República Popular Lao</b>	Asia	17	2.5	0	No	6.8
<b>Letonia</b>	Europa	20	10.6	9.3	Sí	1.88679245
<b>Líbano</b>	Asia	50	8.2	0	No	6.09756098
<b>Lesotho</b>	África	2.3	1.1	0	No	2.09090909
<b>Libia</b>	África	76	11.5	0	No	6.60869565
<b>Lituania</b>	Europa	34	12.3	13	Sí	2.76422764
<b>Luxemburgo</b>	Europa	12	18.9	6.1	Sí	0.63492064
<b>Madagascar</b>	África	15	0.6	0	Sí	25
<b>Malawi</b>	África	10	0.5	0	No	20
<b>Malasia</b>	Asia	364	11.1	0	Sí	32.7927928
<b>Maldivas</b>	Asia	3.4	9.1	0	No	0.37362637
<b>Malí</b>	África	15	0.8	0	No	18.75

<b>Malta</b>	Europa	6.8	14.5	1.7	Sí	0.46896552
<b>Mauritania</b>	África	6.4	1.4	0	No	4.57142857
<b>Mauricio</b>	África	13	10.1	2	No	1.28712871
<b>México</b>	Américas	1220	9.7	36	Sí	125.773196
<b>Micronesia</b>	Oceanía	0.2	1.9	0	No	0.10526316
<b>Mongolia</b>	Asia	17	5.2	0	Sí	3.26923077
<b>Montenegro</b>	Europa	6.7	10.7	0	Sí	0.62616822
<b>Marruecos</b>	África	164	4.6	0	No	35.6521739
<b>Mozambique</b>	África	17	0.5	0	No	34
<b>Myanmar</b>	Asia	82	1.6	0	No	51.25
<b>Namibia</b>	África	16	6.4	0.05	No	2.5
<b>Nepal</b>	Asia	28	0.9	0	No	31.1111111
<b>Países Bajos</b>	Europa	373	21.6	166	Sí	17.2685185
<b>Nueva Zelandia</b>	Oceanía	96	19.2	0	No	5
<b>Nicaragua</b>	Américas	16	2.5	0	No	6.4
<b>Níger</b>	África	9.3	0.5	0	No	18.6
<b>Nigeria</b>	África	461	2.3	0	Sí	200.434783
<b>Macedonia del Norte</b>	Europa	16	7.9	0	Sí	2.02531646

<b>Noruega</b>	Europa	139	26	99	Sí	5.34615385
<b>Omán</b>	Asia	69	15.8	0	No	4.36708861
<b>Pakistán</b>	Asia	433	2.1	0	No	206.190476
<b>Palao</b>	Oceanía	0.2	9.1	0	No	0.02197802
<b>Panamá</b>	Américas	40	9.4	0	No	4.25531915
<b>Papúa Nueva Guinea</b>	Oceanía	9.2	1.1	0	No	8.36363636
<b>Paraguay</b>	Américas	51	7.1	0	No	7.18309859
<b>Perú</b>	Américas	204	6.3	2.7	Sí	32.3809524
<b>Filipinas</b>	Asia	425	3.9	0	No	108.974359
<b>Polonia</b>	Europa	443	11.7	246	Sí	37.8632479
<b>Portugal</b>	Europa	170	16.6	70	Sí	10.2409639
<b>Qatar</b>	Asia	37	13.6	0	No	2.72058824
<b>República de Corea</b>	Asia	818	15.8	292	Sí	51.7721519
<b>República de Moldova</b>	Europa	14	4	0	Sí	3.5
<b>Rumania</b>	Europa	223	11.4	47	Sí	19.5614035
<b>Federación de Rusia</b>	Europa	1631	11.3	90	No	144.336283
<b>Rwanda</b>	África	7	0.6	0.7	Sí	11.6666667
<b>Saint Kitts y Nevis</b>	Américas	0.7	12.4	0	No	0.05645161
<b>Santa Lucía</b>	Américas	1.7	9.7	0.03	No	0.17525773
<b>San Vicente y las Granadinas</b>	Américas	0.9	8.3	0	No	0.10843374
<b>Samoa</b>	Oceanía	0.6	3.1	0	No	0.19354839
<b>Santo Tomé y Príncipe</b>	África	0.3	1.5	0	Sí	0.2

<b>Arabia Saudita</b>	Asia	595	17.6	0	No	33.8068182
<b>Senegal</b>	África	20	1.2	0	No	16.6666667
<b>Serbia</b>	Europa	65	9.4	13	Sí	6.91489362
<b>Seychelles</b>	África	1.2	12.6	0	No	0.0952381
<b>Sierra Leona</b>	África	4.2	0.5	0	No	8.4
<b>Singapur</b>	Asia	113	19.9	0	Sí	5.67839196
<b>Eslovaquia</b>	Europa	70	12.8	30	Sí	5.46875
<b>Eslovenia</b>	Europa	31	15.1	12	Sí	2.05298013
<b>Islas Salomón</b>	Oceanía	0.5	0.8	0	No	0.625
<b>Sudáfrica</b>	África	416	7.1	18	Sí	58.5915493
<b>España</b>	Europa	888	19	287	Sí	46.7368421
<b>Sri Lanka</b>	Asia	138	6.3	0	Sí	21.9047619
<b>Sudán</b>	África	90	2.1	0	No	42.8571429
<b>Surinam</b>	Américas	5.6	9.4	0	No	0.59574468
<b>Swazilandia</b>	África	7	6.3	0	No	1.11111111
<b>Suecia</b>	Europa	208	20.1	142	Sí	10.3482587
<b>Suiza</b>	Europa	201	23.4	123	Sí	8.58974359
<b>República Árabe Siria</b>	Asia	91	5.2	0	No	17.5
<b>Tailandia</b>	Asia	621	9.2	0	Sí	67.5
<b>Timor Leste</b>	Asia	3.8	29	0	No	0.13103448
<b>Togo</b>	África	7.5	0.9	0	No	8.33333333
<b>Tonga</b>	Oceanía	0.3	3.3	0	No	0.09090909
<b>Trinidad y Tabago</b>	Américas	22	15.7	0	No	1.40127389
<b>Túnez</b>	África	76	6.4	0	No	11.875
<b>Turquía</b>	Asia	847	10.2	125	Sí	83.0392157
<b>Turkmenistán</b>	Asia	39	6.5	0	No	6
<b>Tuvalu</b>	Oceanía	0	1.5	0	No	0

<b>Uganda</b>	África	32	0.8	0.18	Sí	40
<b>Ucrania</b>	Europa	324	7.7	40	Sí	42.0779221
<b>Emiratos Árabes Unidos</b>	Asia	162	15	0	No	10.8
<b>Reino Unido e Irlanda</b>	Europa	1598	23.9	871	Sí	66.8619247
<b>República de Tanzania</b>	África	50	1	0	Sí	50
<b>E.U.A</b>	Américas	6918	21	1020	Sí	329.428571
<b>Uruguay</b>	Américas	37	10.5	0	No	3.52380952
<b>Vanuatu</b>	Oceanía	0.3	1.1	0	No	0.27272727
<b>Venezuela</b>	Américas	300	10.7	0	No	28.0373832
<b>Vietnam</b>	Asia	257	2.7	0	No	95.1851852
<b>Yemen</b>	Asia	48	1.5	0	No	32
<b>Zambia</b>	África	19	1	0	Sí	19
<b>Zimbabwe</b>	África	17	1.1	0.03	No	15.4545455